

大分県温泉調査研究会報告

第 71 号

令和 2 年 9 月

目 次

大分県北部地域の温泉の現況調査	大 上 和 敏.....	(1)
鈹泥浴治療における体温変動と治療効果の相関の検証	前 田 豊 樹.....	(11)
別府地域および周辺の地下構造 —地下地質の概要および調査手法—	竹 村 惠 二.....	(19)
別府温泉の熱水系におけるラドンの挙動	大 沢 信 二 他 3 人.....	(29)
別府南部における不圧地下水位の周期変動解析	柴 田 智 郎 他 1 人.....	(39)
由布岳・鶴見岳の地球化学的研究 2	柴 田 知 之 他 1 人.....	(45)
大分県内の火山岩類の化学組成・Sr-Nd同位体比 (5) 九重山その 2	芳 川 雅 子 他 4 人.....	(47)
別府市内の河川における河口域の底生生物分布と温泉排水流入との関係	山 田 誠 他 3 人.....	(53)
別府温泉藻類RG92の培養における光波長の影響	加世田 国与士 他 1 人.....	(61)

序

昭和23（1948）年7月10日、新しい日本国憲法の下で、温泉行政の根幹である温泉法が公布されました。これに応じて、大分県では温泉審議会（現、環境審議会温泉部会）が設置され、温泉行政に関わる重要事項を審議することになりましたが、それらの審議を適切かつ円滑に進めるには、判断の基準となる科学的根拠が必要です。ここに温泉に関する科学的資料を得るための調査機関の設立が企図され、昭和24（1949）年7月16日、「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（会則第3条）」として、大分県温泉調査研究会が発足しました。

以来、本会では、県内各温泉地の現況調査をはじめとする各種の調査研究を実施し、得られた結果を機関誌「大分県温泉調査研究会報告」に掲載・公表してきました。そうして蓄積された成果および大量の温泉分析書や行政資料から、多数の温泉開発（温泉井掘削）がもたらしたさまざまな影響の実態が浮かび上がってきました。自噴泉の減少、動力泉の増加、泉質の変化、泉温の低下、沸騰泉の沸騰の停止、そして掘削深度の増大などです。これらの事実は、これまでも機会あるごとに公表され、そのための行政面での対策も講じられてきました。たとえば、温泉の新規掘削を認めない特別保護地域の設定です。

他方、温泉に関する諸研究分野の基礎的な調査研究も行われてきました。大分県温泉調査研究会報告第1号（1950年）から第70号（2019年）までの70年間に公表された調査研究成果は615編（温泉分析書や集会の記録は除く）に達し、大分県内だけに留まらず、広く温泉研究の発展に貢献しています。

さて、ここにお届けする「大分県温泉調査研究会報告第71号」は、人間なら古希を超えて新たな道へ向かう節目の号と言えます。本号には、医学、地球科学（地質学・地球化学・地球物理学）、生物学に関する9編の報告が掲載されています。多岐にわたる研究課題は、いずれも会員諸氏が自主的に選択したものであり、斬新な観点と手法による研究成果に接することができるのは大きな喜びです。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の意を捧げる次第です。

令和元年度の活動を記した本号を出版するに当たり、会員諸氏の研究の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。

令和2年9月

大分県温泉調査研究会

会長 由佐悠紀

大分県北部地域の温泉の現況調査

大分大学教育学部

大 上 和 敏

要旨

県北地域（中津市，宇佐市，豊後高田市および国東市）の温泉について，温泉水の泉温，主要溶存化学成分等について検討を行った。県北地域の温泉 94 井のうち 34 井が温泉の枯渇等の理由で使用されていない状態であった。本地域の温泉は，冷鉱泉が 3 井，低温泉が 2 井，狭義の温泉が 13 井，高温泉が 16 井あり，15 井が塩類泉，29 井が単純泉であった。温泉水の化学組成についてみると，中津市に湧出する単純泉は全てナトリウム-炭酸水素型であり，宇佐市南部の塩類泉はナトリウム-塩化物泉，宇佐市北部および豊後高田市西部の塩類泉はナトリウム-炭酸水素塩泉，豊後高田市および国東市の塩類泉はカルシウム-硫酸塩泉であった。

1. はじめに

県北地域には、中津市に 54 井、宇佐市に 23 井、豊後高田市に 12 井、国東市に 5 井の温泉の合計 94 井の源泉が存在している（大分県鉱泉誌、2006）。この地域の温泉については、山下，北岡らにより 1950 年から 1989 年にかけて報告がされており，近年は大上ほかにより，[1] 中津市の温泉は、平均泉温が 39.1℃と比較的低く、冷鉱泉の 1 か所を除けば全て総塩分量 1000mg/L 以下の単純泉で、陽イオンとして Na^+ 、陰イオンとして HCO_3^- に卓越した温泉が湧出していること，[2] 宇佐市の温泉は、平均泉温が 43.6℃と比較的高く、この地域の塩類泉は、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 種類が存在すること，[3] 豊後高田市・国東市の温泉は、平均泉温が 38.5℃で、塩類泉の化学組成はナトリウム・マグネシウム-炭酸水素塩泉、カルシウム-硫酸塩泉等 6 種類の泉質がみられることが報告されている（山下，1945，1950；北岡ほか，1989；大上ほか，2017；大上ほか，2018；大上ほか，2019）。

本研究では、平成 28 年度から平成 30 年度に行った、中津市、宇佐市、豊後高田市、国東市の温泉調査を総括し、県北地域の温泉の現況について検討を行った。

2. 試料採取および測定方法

本研究において検討を行った温泉の位置を図 1 に示す。中津市，宇佐市，豊後高田市および国東市には 94 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 34 井であった（図 1）。本研究では、閉止孔等を除く 34 源泉について検討を行った（図 2）。

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。

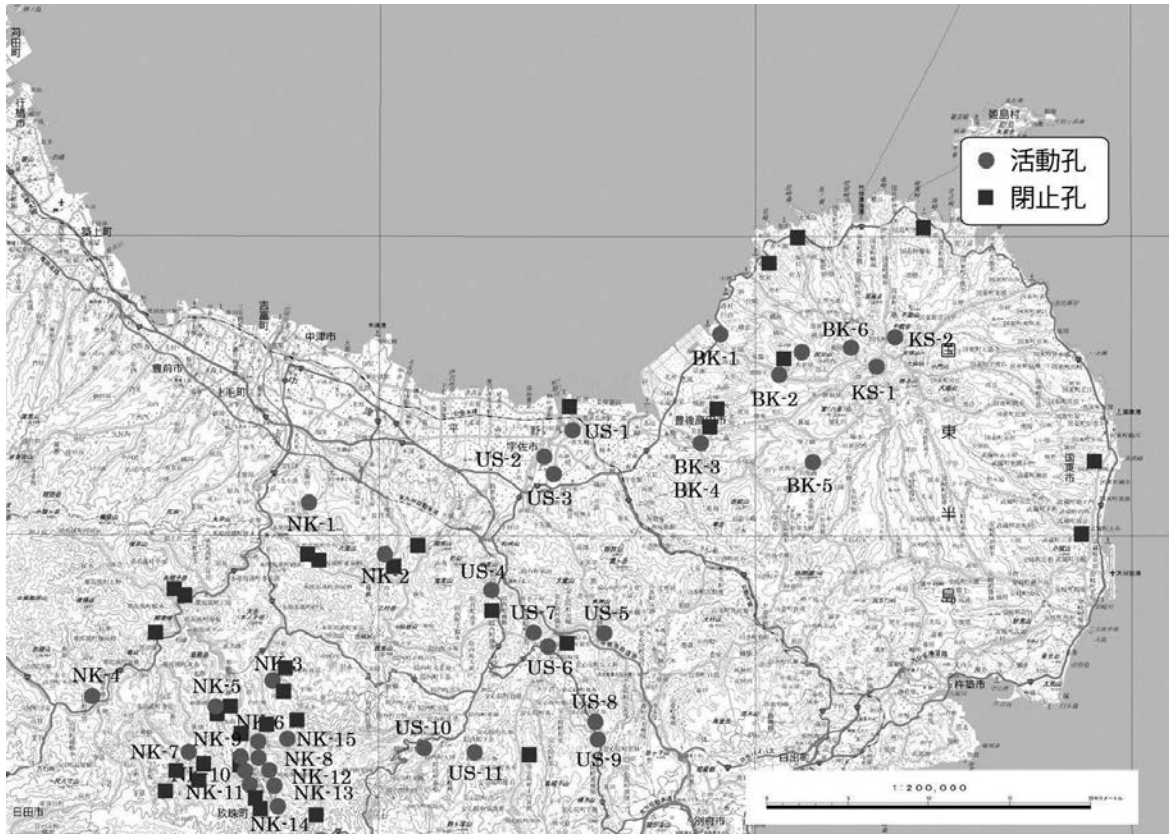


図1 調査地点の概略図（国土地理院20万分の1地形図を改変）

3. 結果

3-1 泉温について

表1に県北地域の温泉の掘削深度と泉温を示す。温泉の掘削深度は、最も浅いもので宇佐市のUS-10の200m、最も深い井戸で中津市のNK-1の1500mであり、多くの源泉が掘削深度500~700mであった。泉温については、NK-2, US-6, BK-4の3源泉が冷鉱泉, NK-1とBK-3の2源泉が低温泉で、温泉(狭義)が13井, 高温泉が16井であった(図2)。掘削深度については、NK-1とBK-6が1500mおよび1200mと深く、その他の源泉は掘削深度が300~800m程度のものが大半を占めており、最も浅井井戸はNK-9の160mであった。掘削深度と泉温について明瞭な相関関係はみられず、US-6とUS-11のように同じ掘削深度でも泉温大きく異なる源泉もみられた。

表1 掘削深度と泉温

(中津市の温泉)

No.	掘削深度 [m]	泉温 [°C]
NK-1	1500	28.0
NK-2	-	19.2
NK-3	800	45.0
NK-4	500	36.1
NK-5	735	44.2
NK-6	500	47.4
NK-7	450	36.3
NK-8	-	42.0
NK-9	160	40.2
NK-10	-	42.6
NK-11	-	38.4
NK-12	500	45.1
NK-13	-	38.0
NK-14	400	41.4
NK-15	500	43.2

(宇佐市の温泉)

No.	掘削深度 [m]	泉温 [°C]
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

(豊後高田市・国東市の温泉)

No.	掘削深度 [m]	泉温 [°C]
BK-1	500	38.4
BK-2	350	37.4
BK-3	600	30.9
BK-4	-	25.1
BK-5	700	42.7
BK-6	1200	56.5
KS-1	880	37.2
KS-2	-	39.6

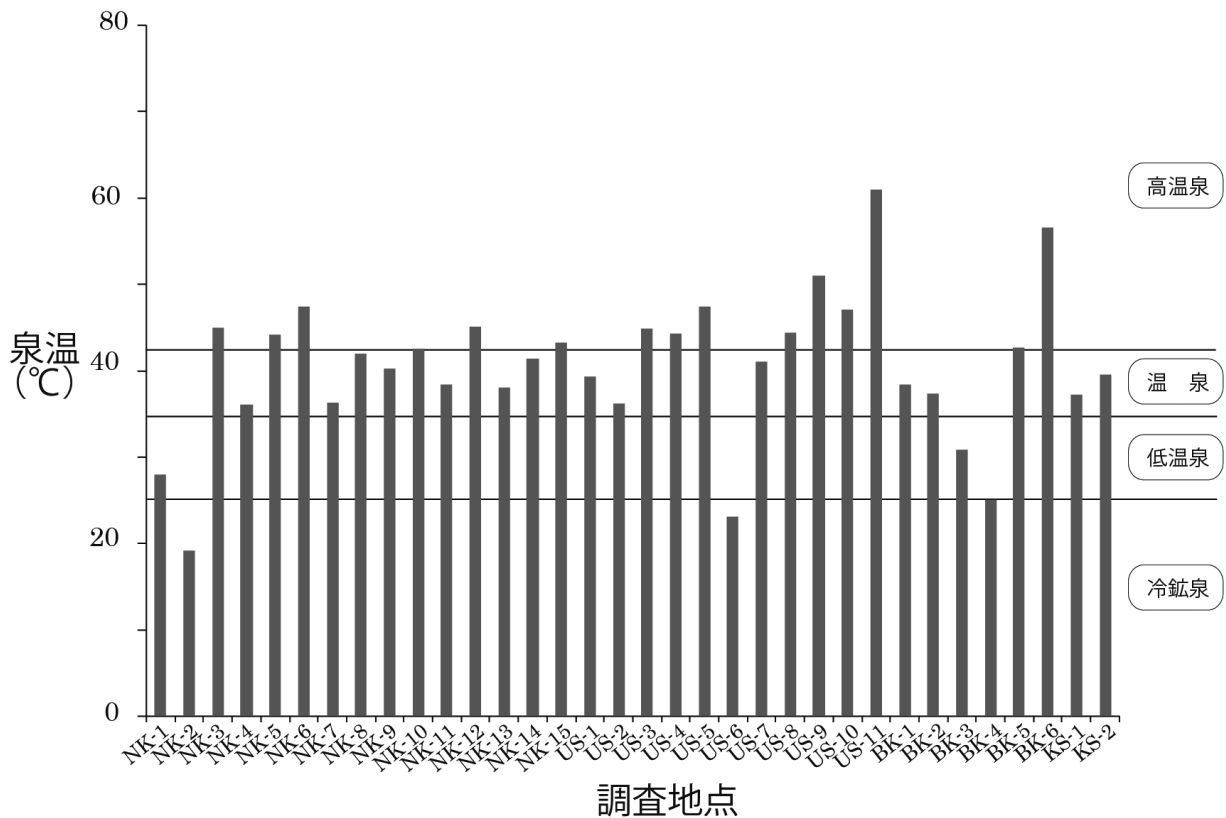


図2 各源泉ごとの泉温

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、弱アルカリ性泉が 20 井，中性泉が 13 井，弱酸性泉は NK - 1 の 1 井のみであった。全体的な傾向として中津市には中性泉が多く，宇佐市の温泉は中性泉と弱酸性泉の両方があり，豊後高田市・国東市は中性泉が多く湧出していた。温泉水の主要溶存化学成分量の総量値(TDS)については，中津市の 1 源泉，宇佐市の 7 源泉，豊後高田市・国東市の 7 源泉の合計 15 源泉が TDS1000mg/L 以上の塩類泉で，それ以外の 29 源泉が単純泉であった (図 3)。地域的には，中津市には単純泉が多く，宇佐市と豊後高田市の西部に高塩濃度の温泉が湧出する傾向がみられた (図 4)。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)，今回検討を行った 34 源泉についても，TDS の値にこの傾向がみてとれる。

温泉水の化学組成では，単純泉の多くはナトリウム - 炭酸水素型であり，塩類泉については，ナトリウム - 炭酸水素塩泉，ナトリウム - 塩化物泉，宇佐市と豊後高田市西部の塩類泉はナトリウム - 炭酸水素塩泉とナトリウム - 塩化物泉，カルシウム - 硫酸塩泉のおおまかに 3 種類の温泉が湧出していた (図 5)。泉質の分布についてみると，宇佐市南部にはナトリウム - 食塩泉，宇佐市北部および豊後高田市西部にはナトリウム - 炭酸水素塩泉，豊後高田市東部および国東市にはカルシウム - 硫酸塩泉が湧出していた (図 6)。

表2 温泉水の分析結果

No.	pH	[mg/L]								
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	総塩分量
NK-1	7.5	14.1	2.7	7.4	9.4	4.7	1.2	97.6	62.4	199.7
NK-2	5.9	101.0	16.6	98.1	34.0	9.3	<0.1	925.1	71.2	1255.2
NK-3	8.5	36.0	4.8	<0.1	0.2	6.3	2.5	76.9	70.7	197.4
NK-4	8.6	80.1	3.6	<0.1	<0.1	6.1	3.7	195.2	52.8	341.5
NK-5	7.9	28.1	3.4	2.1	3.4	4.2	3.6	91.5	70.5	206.9
NK-6	7.7	74.9	13.5	2.0	4.2	21.5	0.1	200.1	45.9	362.2
NK-7	7.5	31.5	18.7	2.6	4.7	6.0	1.3	134.2	5.7	204.6
NK-8	7.9	110.6	25.9	0.8	2.2	40.7	1.0	274.5	69.7	525.4
NK-9	8.4	53.1	13.7	<0.1	0.1	14.3	2.9	125.1	61.2	270.3
NK-10	8.2	78.0	24.5	0.1	0.1	26.1	<0.1	197.6	77.3	403.8
NK-11	8.1	73.2	23.1	0.1	0.2	23.6	1.5	173.9	73.2	368.8
NK-12	8.2	81.7	17.4	0.2	0.6	21.8	3.5	177.5	63.2	366.1
NK-13	8.3	103.7	6.6	<0.1	1.8	9.7	<0.1	305.6	52.8	480.3
NK-14	8.0	110.1	7.4	0.5	3.1	10.9	0.1	286.1	63.0	481.1
NK-15	8.4	159.0	24.3	4.7	11.8	51.4	0.3	456.9	68.3	776.7
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
BK-1	6.4	9817	456	1590	1570	22000	2930	1640	11.3	40000
BK-2	6.8	402	39.5	35.0	48.0	168	106	946	116	1860
BK-3	6.5	431	58.0	350	174	274	10.0	2870	115	4280
BK-4	6.9	233	36.0	178	136	140	15.0	1790	80.3	2610
BK-5	6.5	33.0	5.7	27.0	39.1	50.2	2.4	321	178	656
BK-6	7.7	149	7.5	7.5	203	11.5	635	61.6	13.5	1090
KS-1	7.3	56.5	7.0	4.5	319	8.0	640	51.0	50.2	1140
KS-2	7.9	39.5	4.5	6.5	293	15.0	685	67.7	47.5	1160

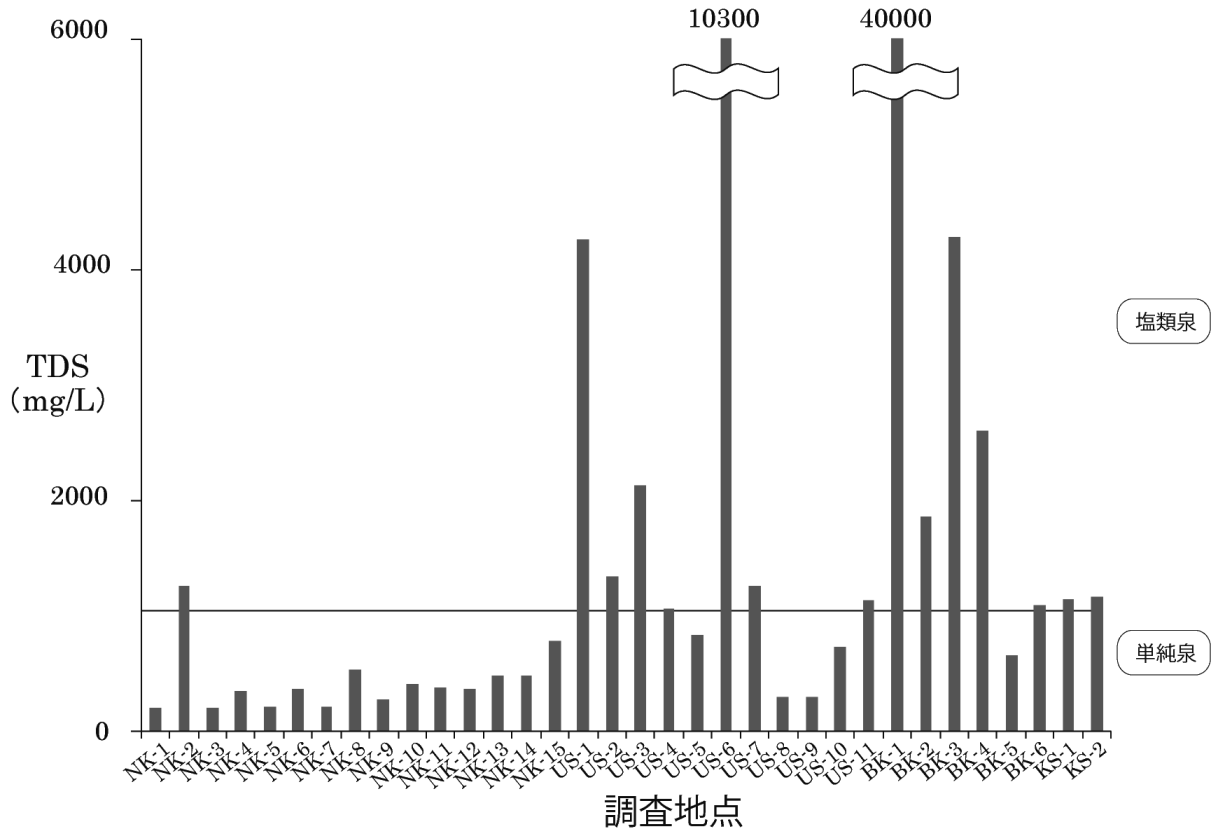


図3 各源泉ごとの総塩分の総量値 (TDS)

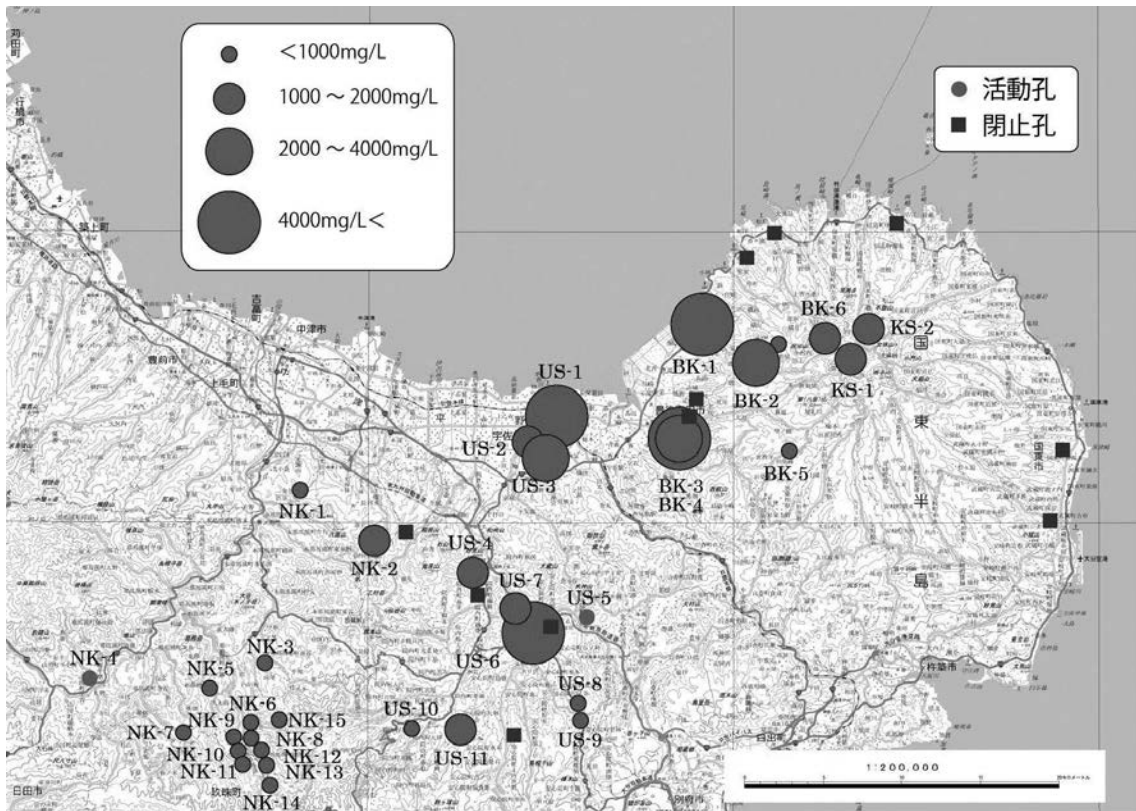


図4 総塩分の総量値 (TDS) の分布

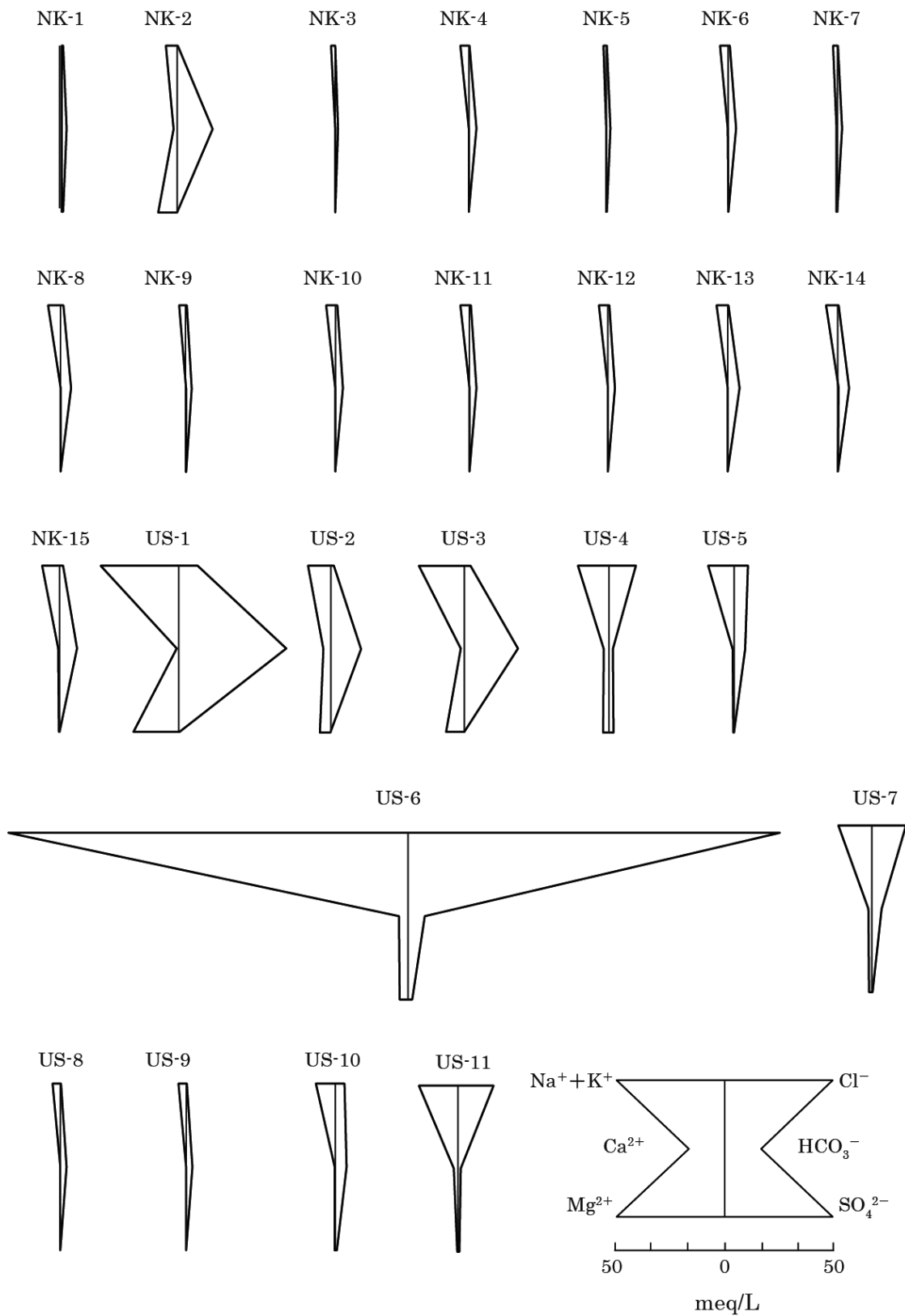


図5 各温泉水の化学組成

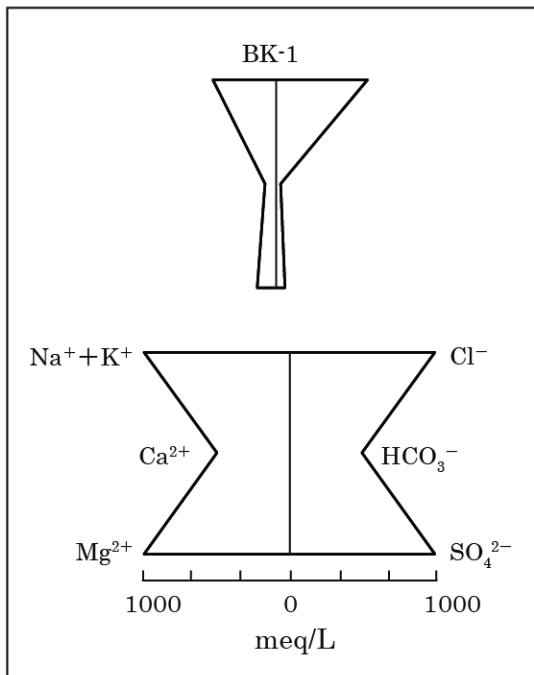
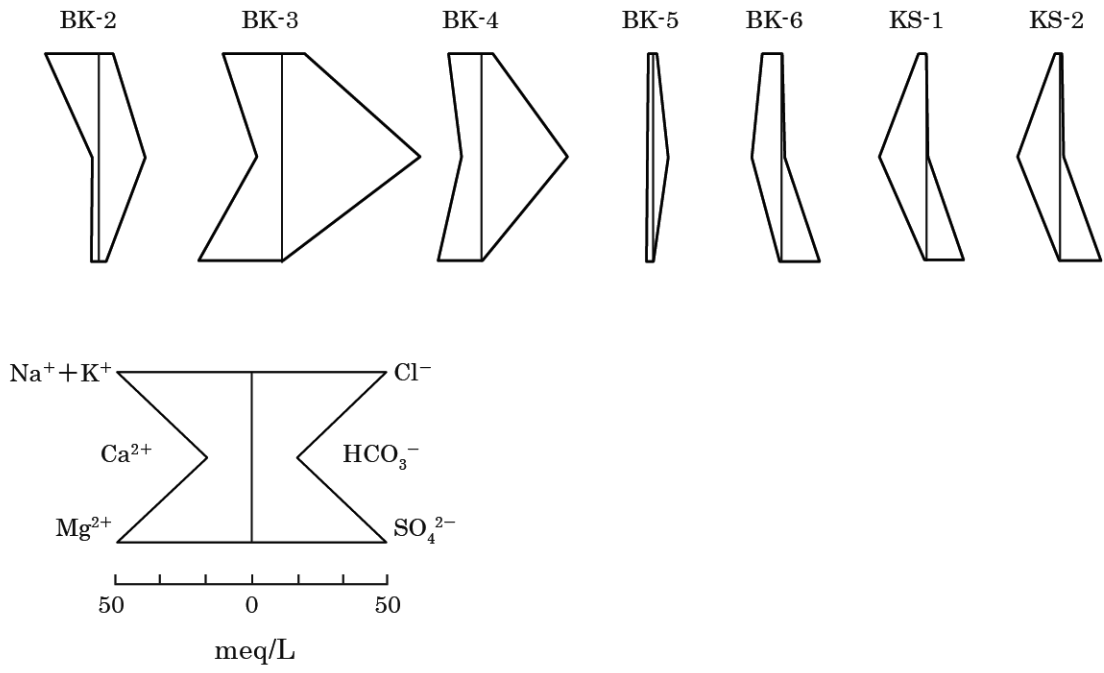


図5 各温泉水の化学組成

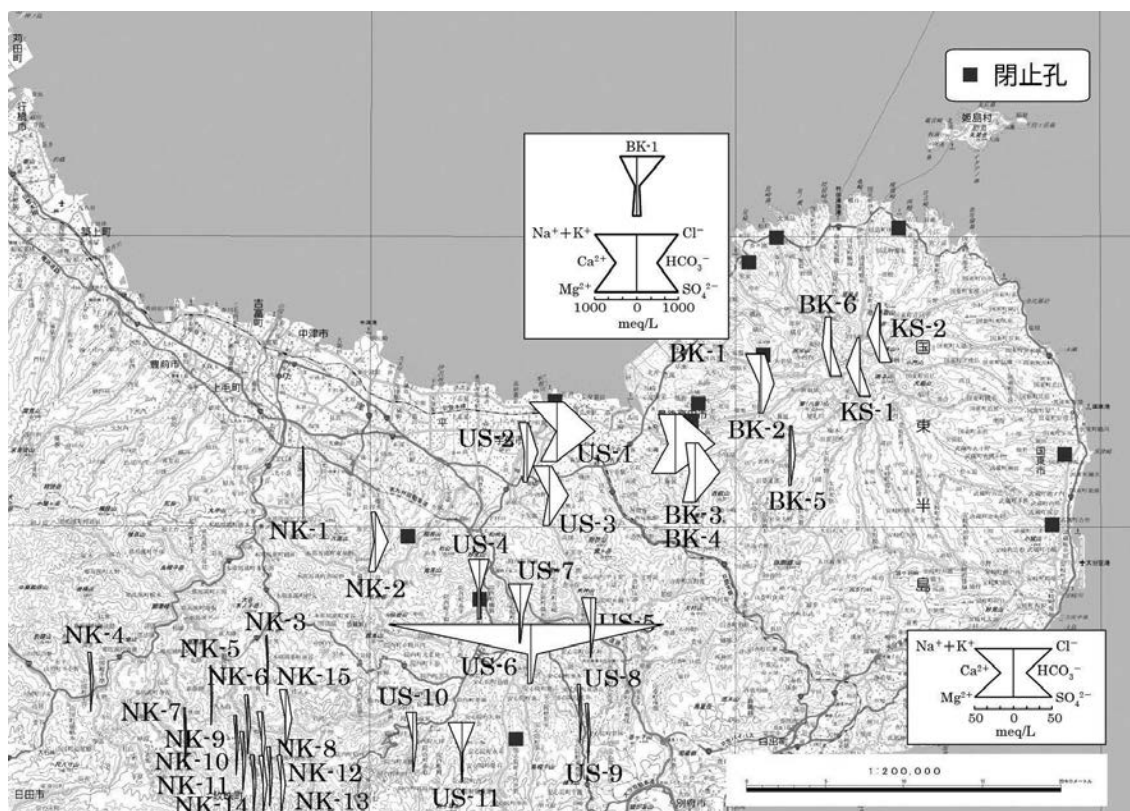


図6 調査地点ごと温泉水の化学組成

4. まとめ

大分県北部地域の温泉について大分県鉱泉誌の既存データおよび平成28年～30年に行った調査結果に基づいて検討を行った結果、次の事が明らかとなった。

- (1) 大分県鉱泉誌に掲載されている中津市、宇佐市、豊後高田市および国東市の泉源94井のうち34井が枯渇もしくは現在使用されていない状況であった。
- (2) 県北地域の温泉の平均泉温は40.4℃であり、その内わけは冷鉱泉が3井、低温泉が2井、温泉（狭義）が13井、高温泉が16井であった。
- (3) 県北地域の温泉は、15井が塩類泉で、29井が単純泉であり、中津市には単純泉が多く、宇佐市、豊後高田市および国東市に塩類泉が多い傾向であった。
- (4) 中津市に湧出する単純泉は全てナトリウム-炭酸水素型であり、宇佐市南部の塩類泉はナトリウム-塩化物泉、宇佐市北部および豊後高田市西部の塩類泉はナトリウム-炭酸水素塩泉、豊後高田市および国東市の塩類泉はカルシウム-硫酸塩泉であった。

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
 大上和敏, 西田翔一 (2017), 中津市の温泉の現況調査, 大分県温泉調査研究会報告, 68,

9–16.

大上和敏, 豊田幸歩 (2018), 宇佐市の温泉の現況調査, 大分県温泉調査研究会報告, 69, 3–10.

大上和敏, 中島美葵 (2019), 豊後高田市, 国東市の温泉の現況調査, 大分県温泉調査研究会報告, 70, 3–9.

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.

鈇泥浴治療における体温変動と治療効果の相関の検証

九州大学病院別府病院内科

前田 豊 樹

緒言：温泉は、水道水温浴に比較して、温熱効果が高く、体温上昇効果に優れるとされる。温泉の温熱効果には鎮痛効果が見られる。九州大学病院別府病院は、国立大学法人では唯一、鈇泥浴施設を擁している。鈇泥浴は、温泉のなかでも体温上昇効果にすぐれており、申請者は、これを慢性全身性疼痛性疾患である線維筋痛症の治療に応用している。本研究報告では慢性疼痛性疾患の代表である線維筋痛症患者で入院して鈇泥浴治療を受けている患者を対象に、鈇泥浴の連日入浴治療における疼痛緩和効果と腋窩体温の推移との相関の検証を着想した。

方法：九州大学病院別府病院内科に入院となった、アメリカリウマチ学会線維筋痛症診断基準(1990)または診断予備基準(2010)により、線維筋痛症患者と診断された20名(男性3名女性17名 平均年齢 57.1 ± 9.5 歳)を対象として、平日連日 40°C 10分間鈇泥浴(期間： 39.6 ± 18.8 日間)を受けてもらった(表1)。鈇泥浴治療開始から7日間、終了時の7日間について、フェイススケール(5点満点)(FS)、腋窩温、それぞれを測定し検討した。

結果：鈇泥浴治療の開始時から終了時の各7日間の平均値の推移は、FSでは 3.1 ± 1.0 点から 2.6 ± 1.0 点に($p=0.14$) (表2)、各人の開始時の7日間平均値を1とした時の変化率は 1.0 ± 0.9 ($p=0.99$)であった(表4)。ただし、例外的にとくに疼痛が強くなった女性1例を除けば、変化率は、 0.8 ± 0.3 ($p=0.01$)であり、疼痛緩和効果が伺えた(表4)。一方、腋窩温については、開始時から終了時の平均値がそれぞれ $36.3 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ から $36.2 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($p=0.24$)であった(表3)。各人の開始時の7日間平均値を1とした時の変化率は 0.997 ± 0.005 ($p=0.02$)と有意の低下を示した(表4)。疼痛フェイススケール変化率と腋窩温変化率間の相関をみたところ、有意の相関は見られなかった(図1)。疼痛増悪が特に強かった例をはずれ値として外した場合でも、やはり有意の相関は見られなかった(図2)。

考察・結論：鈇泥浴が線維筋痛症などの慢性疼痛に有効である事はこれまで報告してきたが、今回、体温変化と鎮痛効果の関連を探った。意外な事に一定期間の鈇泥浴連浴期間後には、腋窩温はむしろ有意に低下する傾向が見られた。これは、これまで鈇泥浴入浴で深部体温(鼓膜温)が、入浴直前に比べて、入浴直後で上昇することとは逆の結果であった(文献1)。そして腋窩温の変化は、疼痛の変化と相関しなかった。この鈇泥浴期間後の腋窩温の低下は、深部体温測定を行っていれば、異なる結果となっていたかもしれない。しかし、腋窩温で有意の変化が見られた事は、体温調節において何らかの影響が見られた事を

示唆している。患者の何人かについては、入院前あるいは鉍泥浴開始間もない頃は、発汗現象があまり見られなかったが、鉍泥浴治療が進むにつれ、「汗が出るようになった。」と体温調節に関連する生理機能の変化に気付く例が見受けられた。このことが体表面温度を下げる事につながった可能性が考えられる。また線維筋痛症において、このような自律神経機能の回復がみられることは、鉍泥浴の治療効果の一部を観察しているのかもしれない。

参考文献

(1) Maeda T, Kudo Y, Horiuchi T, Makino N. Clinical and anti-aging effect of mud-bathing therapy for patients with fibromyalgia. *Mol Cell Biochem* 444, 87-92, 2018.

以上

表1 対象入院患者のプロフィール

患者番号	性別	年齢 (歳)	入院治療日数
1	女性	42	39
2	女性	49	21
3	女性	56	38
4	女性	46	75
5	男性	57	45
6	女性	59	63
7	女性	62	24
8	男性	66	88
9	女性	69	55
10	女性	48	31
11	女性	59	34
12	女性	40	19
13	女性	55	28
14	女性	61	27
15	女性	78	30
16	女性	56	26
17	女性	54	45
18	女性	68	25
19	女性	59	39
20	男性	37	54
平均		57.1	39.6
標準偏差		9.5	18.8

表2 各患者の鈹泥浴治療開始時と終了時各7日間の腋窩温の平均値

患者番号	腋窩温 (開始時7日間)	腋窩温 (終了時7日間)
	平均±標準偏差 (°C)	平均±標準偏差 (°C)
1	36.2±0.3	35.7±0.5
2	36.2±0.2	36.1±0.2
3	36.2±0.4	35.7±0.3
4	36.8±0.3	36.5±0.5
5	36.3±0.8	36.3±0.4
6	36.0±0.4	36.0±0.4
7	36.9±0.2	36.6±0.2
8	36.1±0.3	36.1±0.3
9	36.7±0.3	36.6±0.4
10	36.6±0.3	36.5±0.3
11	36.3±0.2	36.4±0.3
12	36.3±0.3	36.5±0.4
13	36.4±0.3	36.0±0.5
14	36.3±0.2	36.1±0.2
15	35.9±0.3	35.9±0.2
16	36.5±0.4	36.4±0.2
17	36.3±0.3	36.2±0.4
18	36.5±0.2	36.4±0.2
19	35.9±0.6	35.8±0.8
20	36.4±0.2	36.6±0.5
全体平均	36.3±0.3	36.2±0.3
p-value (開始-終了)	0.24	

表 3 各患者の鈇泥浴治療開始時と終了時各 7 日間の疼痛（5 点満点 FS）の平均値

患者番号	FS（開始時 7 日間）	FS（終了時 7 日間）
	平均±標準偏差	平均±標準偏差
1	2.9±1.5	2.8±0.8
2	2.9±1.2	1.1±0.4
3	3.3±0.8	2.8±1.3
4	4.0±0.0	3.4±0.2
5	3.3±0.4	2.5±0.6
6	4.4±1.0	5.0±0.0
7	4.0±0.0	3.6±0.6
8	2.6±0.5	0.8±0.3
9	4.0±0.0	3.4±0.5
10	2.4±1.5	2.7±2.0
11	4.0±0.6	2.2±0.3
12	1.6±1.1	2.5±0.7
13	3.4±2.1	2.0±0.8
14	2.7±1.1	2.0±0.0
15	4.4±0.8	3.6±0.5
16	3.5±1.6	3.5±1.7
17	2.5±0.7	1.1±0.2
18	2.6±0.8	2.3±0.8
19	0.6±0.5	2.6±0.8
20	2.6±0.5	2.1±1.1
平均	3.1±1.0	2.6±1.0
p-value（開始-終了）	0.14	

表4 各患者の腋窩温と疼痛（FS）の入院時平均値を1とした時の退院時平均値（変化率）

患者番号	腋窩温変化率	FS 変化率
1	0.9	1.0
2	1.0	0.4
3	0.9	0.8
4	0.9	0.9
5	1.0	0.8
6	1.0	1.1
7	1.0	0.9
8	1.0	0.3
9	1.0	0.8
10	1.0	1.1
11	1.0	0.6
12	1.0	1.5
13	1.0	0.6
14	1.0	0.7
15	1.0	0.8
16	1.0	1.0
17	1.0	0.5
18	1.0	0.9
19	1.0	4.5
20	1.0	0.8
全体平均	0.997±0.005	1.0±0.9
p-value（1に対して）	0.02	0.99
平均（患者19除く）		0.8±0.3
p-value（患者19除く）		0.01

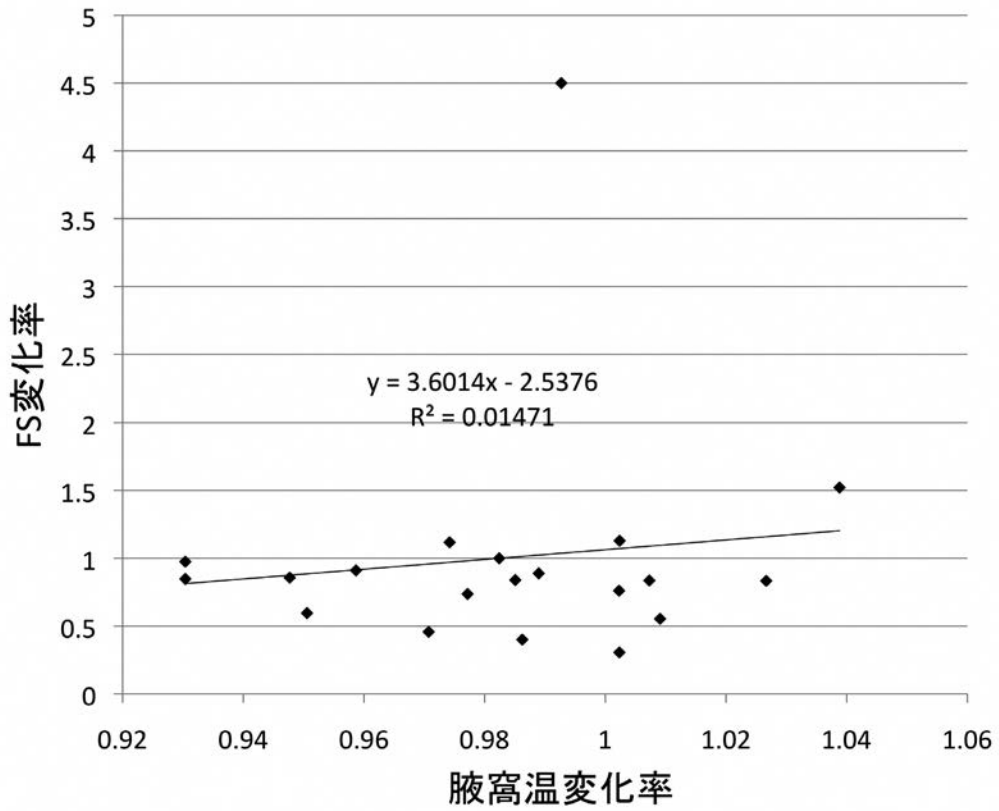


図1 疼痛フェイススケール変化率と腋窩温変化率間の回帰直線とその方程式

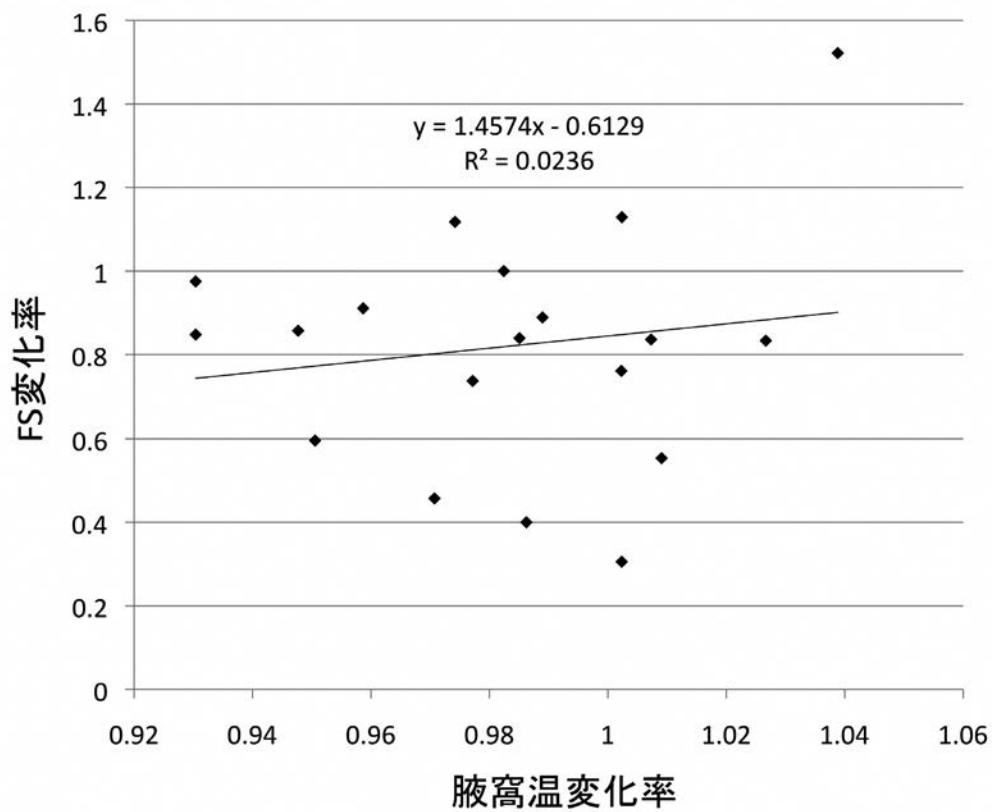


図2 はずれ値を除いた場合の疼痛フェイススケール変化率と腋窩温変化率間の回帰直線とその方程式

別府地域および周辺の地下構造 — 地下地質の概要および調査手法 —

京都大学

竹 村 恵 二

摘要：

別府温泉の利活用等を考察する上で、現在の水文的情報の整理とそれを担う固体地球物理学や地質学的な入れ物に関する形成過程や物性的な情報の整理が重要である。現在の地質学的知見から、別府地溝（由布—鶴見地溝）の地下に分布する可能性のある地層群として、下位から、花崗岩類、豊肥火山活動の火山岩類および堆積岩類（この後半部分が別府周辺の第四紀火山岩類である観海寺安山岩から活火山である鶴見・由布火山群）である。さらに別府湾堆積盆地や別府地溝の形成にともなう断層活動（特に正断層活動による沈降運動）によって、別府扇状地地下にもこれらの岩石群の存在することが推定される。

はじめに

別府温泉の地球科学的まとめや将来の利活用等を考察する上で、現在の水文的情報の整理とそれを担う固体地球物理学や地質学的な入れ物に関する形成過程や物性的な情報の整理が非常に重要な課題となる。ここでは、別府および周辺の地質を整理し、そのうえで、高温の火山性温泉である別府温泉が展開する扇状地を含む地域の固体地球物理学や地質学からみた地下地質構造の概要とそのための調査手法の整理を試みる。

別府周辺の地質および地質構造

別府は、南北方向の海岸、西方に連なる活火山鶴見岳（1375m）を中心とした伽藍岳を含んだ山々、それらをつなぐ扇状地（坂道）で特徴づけられる。扇状地の南側には別府湾から突き出たような高崎山へ続く平坦な山が連なり、扇状地との間は活断層である朝見川—堀田断層によって限られている。扇状地の北側にも丘陵がひろがり、この境界付近も鉄輪断層が推定され、この扇状地の南北に四湯ずつ別府八湯の温泉が広く分布している。さらに北側には別府地溝（由布—鶴見地溝）を画する別府北断層などの断層が分布している（図1、図2）。

別府周辺の地表に分布する岩石や地質は、地球史の中でもっとも新しい第四紀（現在から約260万年間）に形成された。ほとんどが火山活動による岩石である。古い方から並べてみると、観海寺安山岩の活動（190万年前）、浜脇付近に分布する浜脇層の堆積、

由布川火砕流の活動（60 万年前）、南の乙原や小鹿山・雨乞岳・北の鹿鳴越に分布する輝石安山岩の噴出（40-50 万年前）、高崎山や実相寺山の火山活動（30 万年前：角閃石安山岩の活動）があり、現在も鶴見岳・伽藍岳・由布岳の活火山の活動（角閃石安山岩とよばれるデイサイトなどの活動）が継続している。これらの火山活動は、火砕流や土石流を伴い、坂道の風景である扇状地を形成してきた。また海岸沿いと浜脇や亀川には、後氷期の海進にともなう小規模の沖積平野が分布している（星住ほか、1988；竹村、1994 など）。これらの地表に分布する地質体とともに、地下深部に分布する地質体も含めて、別府周辺の地質層序と分布形態を示す地質構造（特に地質分布形態と断層による分布不連続形態など）をまとめることが必要である。

地下構造を推定するための調査手法

地下深部に分布する地質体も含めて、別府周辺の地質層序と分布形態を示す地質構造（特に地質分布形態と断層による分布不連続形態など）を推定するためには、地質学のおよび地球物理学的調査が有用である。

地質学的方法では、下記の3つが基本的に挙げられる。

表層地質と構造調査（地質調査）：標準的な地質調査である表層地質から得られる地質体の層序と構造を含めた地質体の分布形態をまとめた地質図（星住ほか、1988 など）が有効である。その結果は、前章で述べた、観海寺安山岩から沖積層である。

地下地質推定のボーリング調査：地質体の分布状況や地下分布深度等の情報を得るには、地下地質推定のボーリング調査が有効であり、別府市内には多くの温泉掘削のボーリングが貴重な試料・資料である。

地下深部の岩石の火山岩捕獲岩による推定：火山岩の中にある捕獲岩（ゼノリス）の種類により、地下深部に存在する岩石を推定することが可能であり、重要な情報となる。

地下構造推定の地球物理学調査では、下記の項目が調査されている。

重力：重力は、重力加速度（絶対重力値）で平均値 980 cm/s^2 であり、単位としてはガル ($\text{gal}=\text{cm/s}^2$) が使用される。基本的に、万有引力と同じであり、近似的に地球の質量に比例し、地球の中心から地表までの距離の2乗に逆比例する。地球上の密度分布は不均質であるので、各地点の重力測定により重力異常とされる平均値からのずれの量に基づいて、地下岩石の岩石密度の分布（深度や広がり）の推定が可能になり、岩石の種類が想定できれば、深度の情報を得ることができる。地下構造調査における重力のデータは、比較測定法が一般的であり、スプリング式重力計であるラコステ重力計、弦振動型の重力計、超電導重力計などが用いられる。別府周辺では、より広域な傾向も含めたデータ解析では駒澤・鎌田（1985）や Kusumoto et al.（1996）、また別府扇状地に特化したデータは Nishijima & Naritomi（2017）の論文があり、地下構造（特に基盤深度の情報）の概要が記述されている。

人工地震探査：人工地震発振による調査は、屈折法地震探査や反射法地震探査が実施

される。これらは、地下での地震波速度による構造を知ることができる。観測データは時間断面として解析され、それに基づいて速度構造を仮定することから深度断面として解釈が表示される。目的の深度に対応して、種々の振源等の種類が準備される。本地域の広域データは、別府湾における由佐ほか(1992)などの情報が有用であり、国道10号線、由布院盆地、別府扇状地域での情報も整理活用することで、地下構造(地層の境界や分布形態など)が明らかにできる。

地下レーダー探査: 地中における電磁波の反射・屈折・透過などの物理的現象を利用して地下構造探査する方法であり、別府地域では別府扇状地南部の朝見川断層周辺での Kimura et al. (2019)などが実施されており、表層近くでの地下構造推定に有効である。

自然地震観測: 自然地震の観測も地下の速度構造や分布形態に関する情報を提供する。特に、地下での地震発生領域の確定は、地温分布の不均質性などの情報を与える。

電気探査・磁気探査・電磁探査: 大地の比抵抗を調査することにより地下構造を推定する手法である。別府一万年山断層帯調査の一環で実施された相澤ほか(2016)などによる広域の比抵抗分布は、地温分布や関連する岩質の情報を提供する。

他に、電気探査や放射能探査なども地下地質や構造を考察するための重要な情報を提供する。

別府地溝(由布一鶴見地溝)の地下に分布する可能性のある地層群

この報告では、まず、別府地溝(由布一鶴見地溝)に分布する地層群についてまとめる。上記の調査手法は別府でも多く適応されてきた。地熱開発に関係した地下構造調査である NEDO の総合的調査報告として、上記の調査項目内容等を含んだ「広域熱水流動系調査・鶴見岳地域」「地熱開発促進調査・大分川上流」の報告がある。また、文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科(2017)による「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」の成果報告も関連する情報が記載されている。

別府地溝(由布一鶴見地溝)の地下に分布する可能性のある地層群としては、まず地表地質図でまとめられた地質体である、下位から、観海寺安山岩、浜脇層、由布川火砕流、小鹿山火山など輝石安山岩、高崎山火山や実相寺山火山などの角閃石安山岩、鶴見岳・伽藍岳・由布岳の角閃石安山岩、および扇状地を構成する礫層と海岸沿いの沖積層(星住ほか, 1988; 竹村, 1994 など)である。それらの地質体以外の岩石は別府地域の地表に分布する地質体の基盤となる岩石が重要である。また、この地域の火山活動の岩石が基本的に陸域で生じることから、噴出する溶岩と同時形成の火砕流や土石流などの地下での分布の確定は困難なことが考えられるが、このことも地下構造の推定において考慮しておくことが必要とされる。

星住ほか(1988)の別府図幅によれば、「地域北縁より北 1.5 km の豊岡図幅地域内と、

地域南縁より南 2km の久住図幅地域内とに、それぞれ白亜紀花崗岩が露出しており（笹田，1987）、本図幅地域内の火山岩類の外来岩片に花崗岩が発見されることと合せて考えると、本地域の地下には白亜紀花崗岩（及びそれに伴う変成岩）が伏在していると推定される。重力値から推定された基盤岩までの深さは 1-4km に達する（駒澤・鎌田，1985）。と記述されており、別府扇状地域の地下には、白亜紀花崗岩の分布が推定される。

また、星住ほか(1988)の別府図幅による鶴見岳の主火山体噴出物 (T0) の記載には、「鶴見岳の大部分を占める角閃石安山岩溶岩及び火砕物であり、浸食が進み火山地形は不明瞭である。わずかに南平台の南東に溶岩地形が残存するのみである。岩石は青灰色 - 灰色 - 赤紫灰色の安山岩で、斑晶として少量の斜長石・普通角閃石と微量の紫蘇輝石・黒雲母・石英・普通輝石を含む。斑晶の量比はところにより変化する。捕獲岩片として花崗岩を含むことがある。」とされ、「捕獲岩片として花崗岩を含むことがある。」の記述があり、この火山活動の際にマグマが周辺の岩石として花崗岩を取り込んでいることから、鶴見火山の地下深部には花崗岩が分布していることが推定できる。

さらに、星住ほか (1988) によれば、「小鹿山火山は中心噴出型の火山で、その噴出中心は現在の分布域よりも北方の鶴見岳付近あるいは別府湾にあったと推定される。」と記述されていることから、別府扇状地域の地下には、小鹿山火山などの輝石安山岩の分布も予想できる。

星住ほか (1988) によれば、「水口山火山は、北縁を由布院断層で切断され、南へ薄くなっており、噴出中心は現在の由布 - 鶴見地溝内、おそらく由布岳付近にあったと推定される。」と記述されており、由布院断層や朝見川断層の北側の地下に 30 万年前程度に活動した角閃石安山岩が分布していることが予想される。この分布深度等が明らかになれば朝見川断層の活動性に関する情報を得ることもできる。

また、竹村(1994)によれば、「別府の約 1.5 km 北方安心院町南部の津房川沿いの鶴や丸田地域の白亜紀の花崗岩が露出しており（星住・森下、1993）、この花崗岩が別府地域の基盤岩として別府地域の地下 2-4 km に存在していると推測され、城島高原での掘削でも採取されている。」と記述されており、別府扇状地地下深部に花崗岩の分布を推定でき、他の地球物理学的情報からの推定を含めて花崗岩類の分布形態や分布深度の精度を高めることができる。

さらに、ボーリング試料観察による由布川火砕流の扇状地域の地下での分布（星住ほか、1988、竹村・檀原、1993）、ボーリングでの輝石安山岩（乙原溶岩）の分布（中西ほか、2015）、扇状地を構成する 2 種の礫層区分（森山、1969 ; 1972）、ボーリングデータによる扇状地礫層の想定基底深度分布（竹村、1994）などの論文や報告がある。

このように、現在の地質学的知見から、別府地溝（由布 - 鶴見地溝）の地下に分布する可能性のある地層群として、下位から、基盤岩とされる花崗岩類（密度や速度情報から推定される）、約 6 Ma から始まる豊肥火山活動（鎌田、1985 など）の火山岩類または

堆積岩類(この後半がこれまで整理した別府周辺の第四紀火山活動と対応する)であり、別府湾堆積盆地や別府地溝の形成にともなう断層活動(特に正断層活動による沈降運動)によって、別府扇状地地下にこれらの岩石群の存在することが推定される。この火山活動や沈降運動に伴い、地溝内に層厚の礫層が堆積しており、関連する火山活動期と対応した礫種構成や地下分布が想定できる。少なくとも火山岩の種類と対応すると考えられる2種の礫層の存在を考慮することが重要である。海岸沿いの沖積層も現在の地層構成(特に海岸域の地層構成)に重要である。

これらの地層がどのような深さでどのような分布をするかを他の地球科学的探査の成果をまとめて、別府地域の地下の構造を想定する研究の継続が必要である。

まとめ

現在の地質学的知見から、別府地溝(由布一鶴見地溝)の地下に分布する可能性のある地層群として、下位から、花崗岩類、豊肥火山活動の火山岩類および堆積岩類(この後半部分が別府周辺の第四紀火山岩類の観海寺安山岩から活火山である鶴見・由布火山群)であり、別府湾堆積盆地や別府地溝の形成にともなう断層活動(特に正断層活動による沈降運動)によって、別府扇状地地下にもこれらの岩石群の存在することが推定される。これらの地層がどのような深さでどのような分布をするかを他の地球科学的探査の成果をまとめて、別府地域の地下の構造を想定する研究の継続が必要である。

文献

- 相澤広記・小山崇夫・志藤あずさ・若林翌馬・宮崎真大・内田和也・塚島祐子・塚本果織・高島 奏・近藤健太郎・河本洋輝・藤田詩織・山本有人・緒方美季・上嶋 誠(2016): 別府一万年山断層帯の比抵抗構造, 地球惑星科学連合大会, 2016.05.
- 星住英夫・森下祐一(1993):「豊岡地域の地質」5万分の1地質図幅及び説明書。75頁。地質調査所。
- 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎(1988):「別府地域の地質」5万分の1地質図幅及び説明書。131頁。地質調査所。
- 鎌田浩毅(1985):九州中北部における火山活動の推移と地質構造. 地調報告, 264, 33-64.
- Kimura, H., Nakanishi, T., Katsuki, K., Hong, W., Hisanori Matsuyama, H. and Takemura, K. (2019): Holocene activity of the Asamigawa fault detected from sediment cores and a ground-penetrating radar cross-section in the Beppu area, southwestern Japan. *Quaternary International*, 503, 87-96. online journal homepage: www.elsevier.com/locate/quaint
- 駒澤正夫・鎌田浩毅(1985):豊肥地域の重力基盤構造. 地調報告, 264, 305-333.
- Kusumoto, S., Fukuda, Y., S. Takemoto, S. and Yusa, Y. (1996): Three-dimensional

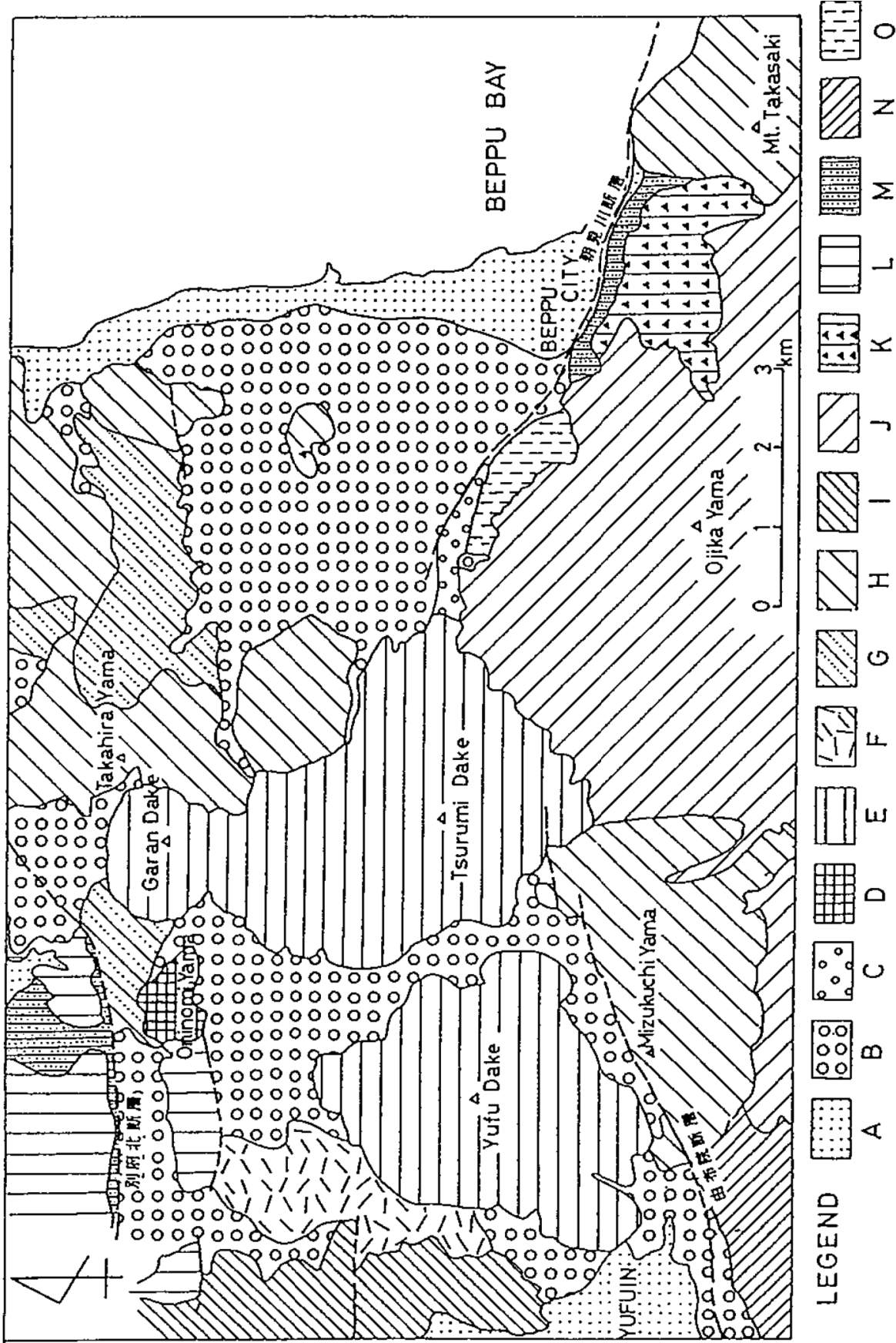
- subsurface structure in the eastern part of the Beppu-Shimabara Graben Kyushu, Japan, as revealed by gravimetric data. *J. Geod. Soc. Japan*, 42, 167-181, 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017) : 「別府－万年山断層帯 (大分平野－由布院断層帯東部) における重点的な調査観測」平成 26～28 年度成果報告書、526p
- https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/beppu_haneyama/h28/26_28Report_all.pdf
- 森山善蔵 (1969) : 別府温泉の貯湯岩層について. 九州大理学部研報 (地質), 9, 207-221.
- 森山善造 (1972) : 別府地方の地質図と岩石について. 大分県温泉調査研究会報告、23、43-49.
- 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.
- Nishijima, J. and Naritomi, K. (2017): Interpretation of gravity data to delineate underground structure in the Beppu geothermal field, central Kyushu, Japan, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 10.1016/j.ejrh.2015.11.022, 11, 84-95.
- 笹田正克 (1987) : 豊肥地域の先第三紀基盤岩類. *地調月報*, vol. 38, p. 385-422.
- 竹村恵二 (1994) : 別府地域の地質. 別府市自然環境調査報告書. (付図: 地質図)
- 竹村恵二・檀原徹 (1993) : 由布川火砕流のフィッシュ・トラック年代. *火山*, 38、63-66.

図1

時代	南部山地	地溝地域	北部山地
完新世 1万年前		沖積層	
更新世後期 13万年前		扇状地堆積物 鬼箕山火山 由布-鶴見火山群	
更新世中期	高崎山火山 水口山火山	高平山火山 実相寺山火山	鹿鳴越火山群 西ノ台流紋岩 雛戸山安山岩
	小鹿山-雨乞岳 火山群 由布川火砕流 浜脇層	福万山-立石山 火山群	
78万年前 更新世前期	倉木山安山岩		
260万年前	観海寺安山岩		

別府地域の地質 (竹村, 1994を改変)

図 2



別府地域の地質図 (星住ほか, 1988を編集した竹村, 1994)

A: 沖積層、B: 扇状地堆積物、C: 段丘堆積物、D: 鬼塚山火山、E: 由布一鶴見火山群、F: 池代火砕流堆積物、G: 岩屑なだれ堆積物、H: 高平山一水口山火山群、I: 福万山一立石山火山群、J: 小鹿山一雨乞岳火山群、K: 由布川火砕流、L: 高陣ヶ尾安山岩、M: 浜脇層および寒水川層、N: 倉木山安山岩、O: 観海寺安山岩

別府温泉の熱水系におけるラドンの挙動

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・豊 嶋 美 憂
三 島 壮 智

秋田大学理工学部システムデザイン工学科

網 田 和 宏

要 旨

別府温泉を特徴づける沸騰泉のラドン(Rn)に関する地球化学的な研究を行った。本研究では熱水と蒸気を同時に研究対象とし、熱水、蒸気凝縮水、非凝縮ガスそれぞれの Rn 濃度と流出量を測定し、それらのデータを用いて沸騰前に熱水中に含まれていた Rn 濃度を計算から求めた。その結果、熱水に溶存する Rn のほとんどが沸騰によって生じる水蒸気へ移動することが定量的に示され、さらに、別府温泉の地下の熱水には思いもよらない量の Rn が溶存していることが明らかにされた。また、熱水試料のラジウム(Ra)の分析も行い、地下の熱水中で Ra と共存する Rn には放射平衡では説明できない過剰の Rn が含まれていることも明らかとなった。

1. はじめに

別府温泉の特徴である豊富な泉質の中にあって、存在しない泉質のひとつに「放射能泉」がある。歴史的に放射能を含む温泉の研究はラドン (Rn) とラジウム (Ra) を主な研究対象にしてきたことから、放射能泉は Rn と Ra の濃度によって規定されている。温泉法では、Rn を 20×10^{-10} Ci/kg (5.5 マッヘ、 ^{222}Rn として 74 Bq/kg) 以上、もしくは Ra を 1×10^{-8} mg/kg (^{226}Ra として 0.37 Bq/kg) 以上を含有する場合に温泉とみなされ、Rn を 30×10^{-10} Ci/kg (8.25 マッヘ、 ^{222}Rn として 111 Bq/kg) 以上含有する場合には療養泉と定義されている (山本・富田, 2015)。Rn には質量数の異なる同位体が存在するが、そのうち主要な Rn は質量数 222 の Rn であり (^{222}Rn)、ウラン系列に属し、 ^{226}Ra の放射崩壊 (半減期 1600 年) によって生成し、さらに半減期 3.8 日で ^{218}Po に変化する。

これまで多くの研究者によって、全国の放射能泉についての研究がなされてきた。堀内 (1981) によると、412 の温泉地 2651 泉源のうち、放射能泉の基準値 74 Bq/kg 以上の泉源は 24%、療養泉の基準値 111 Bq/L 以上の泉源は約 19%あるとされている。別府温泉では、古くは、温泉水の Rn 濃度の分析 (古賀ほか, 1956) や噴気中の Rn 濃度の計測 (古賀, 1983) がなされたが、それらの Rn の起源については十分に明らかにされていない。また、最近では、炭本・中渡瀬 (2013) によって沸騰泉の蒸気 (噴気泉) に多量の Rn が存在することが報告さ

れ、岸田（2019）は沿岸海底湧水の研究において対照試料として別府地域の河川水や地下水とともに自然湧出の温泉の Rn 濃度を測定している。

図1に、別府温泉の沸騰泉と一般温泉（沸騰泉以外の温度の低い温泉を京都大学では「一般温泉」と呼称してきた歴史がある）の泉源数の推移を表した。この資料には、1960年代の高度成長期に沸騰泉の数が急激に増加していることが現れているが、別府温泉の Rn に関する研究（古賀ほか、1956）はそれ以前に行われたもので、沸騰泉のデータは海地獄などの自噴泉のものに限られ、研究対象の大多数が一般温泉であった。また、別府温泉の噴気の Rn に関する研究（古賀、1983）や沸騰泉にともなう蒸気（噴気泉）の研究（炭本・中渡瀬、2013）は高度成長期以降になされたものであるが、同時に噴出する熱水は研究対象にしていない。そこで、別府温泉に関する Rn の地球化学情報を網羅的に入手し、地熱系における Rn の挙動や起源について深く考察していくことを最終目標として、別府温泉を特徴づける沸騰泉を研究対象に選び、熱水と蒸気の双方に着目して研究を行った。本論文では、その成果を報告する。

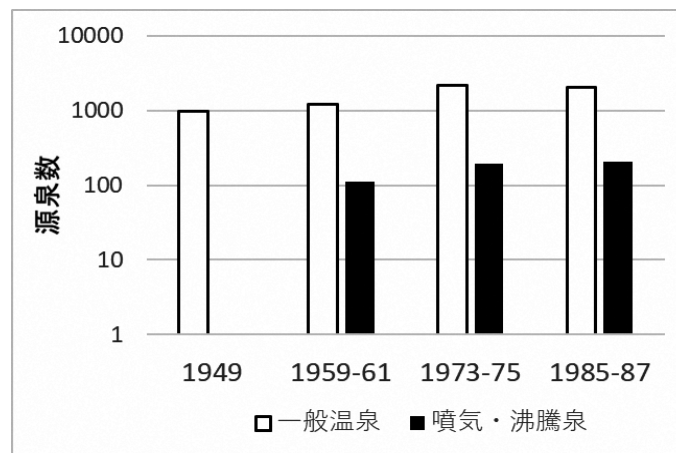


図1 別府温泉の噴気・沸騰泉と一般温泉の泉源数の変遷
(データは、由佐(2012)より引用)

2. 研究方法

2-1. 試料の採取と現地における測定

本研究の対象である沸騰泉は熱水と蒸気の混合流体を噴出する温泉であり、熱水と蒸気が分離されるセパレータ機能をもつ貯湯タンクを設置している泉源において、図2のように、熱水と蒸気に分けて分析用の試料を採取した。タンクの上部から噴出する蒸気はアルミ管（ホームセンターで販売されているものを利用）に導き、管内の蒸気が外気温と同じくらいになるまでアルミ管を複数連結し、末端に取り付けた3方ガラス管の下方へ流出する凝縮する水蒸気（凝縮水）を容積既知のポリびんに採取し、同時に凝縮水でびんが満杯になる時間を計測した。3方ガラス管の上方へ向けた口へは凝縮しなかったガス（非凝縮ガス）が流出してくるので、厚手のビニール袋（70L）に集め、それがガスで一杯になる時間を計測した。

一方、タンク内で蒸気から分離された熱水は、タンク下部に取り付けられた熱水の流出口よりポリびんに採取した。また、その流出量を容積既知のバケツとストップ・ウォッチを用いて求めた。このほかに、現地では、流出熱水の水温、pH、電気伝導度を測定した。

以上の作業を、別府温泉の堀田第一泉源と火売泉源で行った。

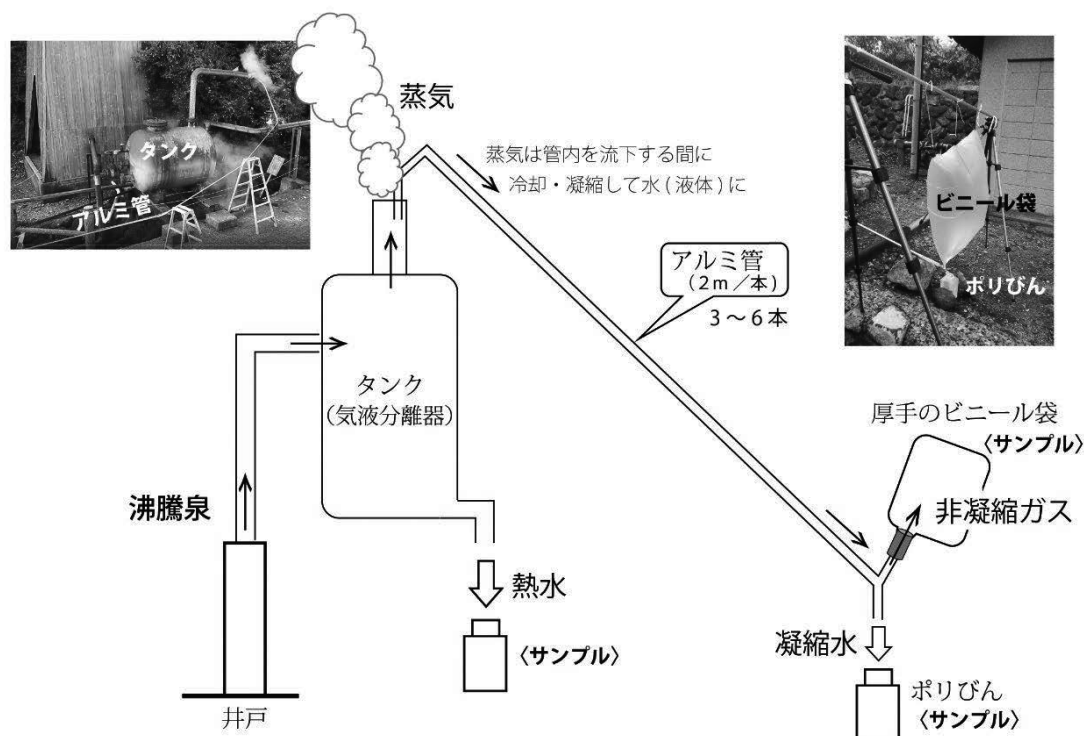


図2 沸騰泉における分析用の熱水および蒸気試料の採取方法

2-2. 試料の分析

2-2-1. Rn 濃度の測定

熱水、凝縮水、非凝縮ガスのいずれの試料も、Rn 濃度の測定には、DurrIDGE 製静電捕集式ラドンモニタ (RAD7) を使用した。この装置は、元来、室内大気中の Rn 濃度測定用に開発された可搬型の計測器であるが、別売りのバブリングキット (RAD H₂O) を接続することで、水試料中の Rn が分析可能である。バブリングキットを使い、250mL の専用ガラスびんに入れた熱水試料あるいは凝縮水試料へ空気の細泡を送り込んで Rn を気相中に追い出し、酢酸カドミウム水溶液と乾燥剤 (ドライアライト) を順次通して RAD7 に送り込み Rn 濃度を測定する。ここで、酢酸カドミウム水溶液を用いるのは、熱水試料と凝縮水試料に溶存する H₂S が Rn と一緒に RAD7 に送り込まれて検出器が劣化するのを防ぐためである。非凝縮ガス

試料については、試料ガスの入ったビニール袋を酢酸カドミウム水溶液と乾燥剤につなぎ、ポンプにより RAD7 に送り込み Rn 濃度測定を行った。

Rn は採取してから測定するまでの間に放射壊変して濃度を減じているため、下式により採取時の濃度に補正した。

$$Rn_0 = Rn \cdot e^{-\lambda_{222}t}$$

ここに、 λ_{222} は Rn の崩壊定数 (0.181 day^{-1})、 Rn_0 は採取時の Rn 濃度 (Bq/L)、 Rn は測定時の Rn 濃度 (Bq/L) である。

なお、RAD7 は可搬型分析装置 (半減期が極めて短い ^{220}Rn も測定可) であることもあり、測定精度は CV% にして 45% 以下とあまり良好でないが、検出下限はおよそ $2 \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$ と高感度である。

2-2-2. 熱水試料の Ra 濃度の測定

閉鎖系ではおよそ 1 カ月後に ^{222}Rn と ^{226}Ra は放射平衡に達するため、閉鎖系で永続平衡状態にした試料の ^{222}Rn の分析値 (放射能) から ^{226}Ra の濃度 (放射能) を求めることができる。これを利用し、下記の方法によって熱水試料中の Ra 濃度を Rn の分析から間接的に求めた。

採取した熱水試料を空気の細泡で 3 時間バブリングをして試料中の Rn を試料水から完全に追い出した後、250mL の専用ガラスびんに移して密封し、 ^{222}Rn と ^{226}Ra が平衡状態になるまでびんごと水中に沈めて 1 ヶ月以上冷暗所に放置した。その後、熱水や凝縮水の Rn 濃度の測定と同様にして、RAD7 を用いて Rn 濃度を測定した。ここでも、Rn と同様に試料採取時から分析までに要した時間の補正が必要であり、以下の式から試料採取時の Ra 濃度を導出した。

$$Ra = \frac{Rn_e}{1 - e^{-\lambda_{222}t}}$$

ここに、 Rn_e は平衡状態の Rn 濃度 (Bq/L)、 Ra は試料水中の Ra 濃度 (Bq/L)、 λ_{222} は Rn の崩壊定数 (day^{-1})、 t は放置した日数 (day) である。

なお、RAD7 を用いた Ra の測定法は一般にほとんど知られていないため、外部分析機関 (公益財団法人日本分析センター) に依頼し、Ra 分析法として信頼性のあるゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーによって同じ試料を分析し、データのクロスチェックを行った。使用した試料は火売泉源の熱水で、その一定量を蒸発乾固し、測定容器に押し固めて 2 週間以上放置した後、 ^{226}Ra の子孫核種の ^{214}Pb に対してゲルマニウム半導体検出器を用いて 200000 秒間以上測定し、永続平衡を仮定して ^{226}Ra 濃度とした。クロスチェックの結果は、ガンマ線スペクトロメトリーによる分析値が 0.014 Bq/L であるのに対して、RAD7 による分析値は 0.02 Bq/L と分析精度内で一致し、RAD7 による Ra 間接分析法の信頼性が裏付けられた。

2-2-3. 熱水試料の主要溶存化学成分の分析

実験室に持ち帰った熱水試料について、pH4.3 アルカリ度を測定し、 HCO_3^- 炭酸水素イオン濃度に換算した。温泉水の主要化学組成 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) については、イオンクロマトグラフ (Thermo Fisher Scientific 社製 ICS-1100) を用いて定量した。得られた化学分析値は、地化学温度計による地下熱水温度の推定に使用した。今回用いた地化学温度計は、汎用性の高い Na-K-Ca 温度計である (例えば、大沢ほか, 2010)。

3. 結果

3-1. 熱水の化学組成

熱水の分析・測定データを表1に示す。分析データから、火売泉源は典型的な Na-Cl 型泉質の熱水性温泉であることが明らかである。一方、堀田第一は Cl 濃度が火売泉源熱水の半分程度であり、 HCO_3^- と SO_4^{2-} の濃度が相補的に高く、蒸気性温泉の性質を合わせもつことから、熱水性温泉と蒸気性温泉の中間型といえる泉質である。また、流出量も少ないことから、熱水流動層と蒸気層の境界付近に形成された蒸気混合型の熱水ではないかと考えられる。

表1 研究対象の沸騰泉熱水の水質、水温と流出量

源泉名	水温 (°C)	pH	流出量 (L/分)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	SO_4 (mg/L)	HCO_3 (mg/L)
堀田第一	97.1	7.8	20.6	630	80	n.d.	33	700	450	110
火売	97.1	7.8	85	1000	110	2	51	1400	250	24
【注】・ n.d. (not detected) : 検出されず, n.m. (not measured) : 測定せず										
・ 試料採取日 : 堀田第一2017/11/9, 火売2019/5/22										

3-2. Rn ならびに Ra 濃度

熱水試料の Rn と Ra の濃度と、蒸気 (凝縮水および非凝縮ガス) 試料の Rn 濃度を、表2に示す。火売泉源では、Rn 濃度測定に必要な量の非凝縮ガスを採取できなかったため、その Rn 分析データは得られていない。また、濃度単位の分母にある体積 (L) は、熱水と凝縮水は液体状態の体積であるが、非凝縮ガスのそれは気体状態のものであり、両者の多少を単純に分析値だけから比較できないことを断っておく。しかしながら、蒸気凝縮水の Rn 濃度と熱水のその比は、堀田第一、火売それぞれ 7.4, 16.5 であり、Rn は熱水より蒸気に付きやすいことが明らかで、この結果は、Rn は常温以上では気

表2 研究対象の沸騰泉の Rn および Ra の分析データ

源泉名	試料採取日	Rn濃度			Ra濃度
		熱水 (Bq/L)	蒸気		熱水 (Bq/L)
			凝縮水 (Bq/L)	非凝縮ガス (Bq/L)	
堀田第一	2019/5/20	0.39	2.9	14	0.02
火売	2019/5/22	0.02	0.33	n.a.	0.02
【注】 n.a. (not analyzed) : 試料量不十分で分析できず					

体状態で安定に存在することが知られていることから非常に理解しやすく受け入れやすい。さらに、Rnは希ガス元素で単原子分子として存在することから、凝縮水よりもさらに非凝縮ガス試料に濃集していることが予想され、表2の堀田第一のデータはそれを暗示している(明言できない理由は先述)。そこで、考察では、さらに流量データを加味して、Rnの蒸気への濃集を定量的に示すことにする。

4. 考察

4-1. 沸騰による Rn の挙動について

高山ではお湯が沸きにくいことを知っている人は多い。それは、気圧が下がると水の沸点が下がるという水の物理的性質にもとづくが、圧力が上がると沸点はどうかとなると知る人の数は減る。逆に圧力が上がると沸点は上がるのであるが、その結果、地面の下の世界には沸騰していない 100°Cより温度の高い熱水が存在することになる。そのような地下の熱水が何らかの理由で浅部へ上昇すると圧力が低下し、沸点に達して沸騰を起こすことがある。沸騰泉はそのようにして生じると考えられており、別府温泉の重要な景観をなす湯けむりや沸騰泉を地下に辿ると 100°Cを越す熱水に出会うと考えられている。そこで、蒸気(凝縮水試料と非凝縮ガス試料)中の Rn は元々蒸気を分離させる前の熱水中に存在していたとし、熱水と凝縮水ならびに非凝縮ガスの流出量データ等を使って、沸騰前の熱水中の Rn 濃度を計算で求めてみた。なお、凝縮水と非凝縮ガスは流出量の全量が測れていないので、それを知る工夫が必要であるが、エンタルピー保存を仮定して地表噴出時における気液分離比を推算し、熱水の流出量とその比率を用いて蒸気放出量の全量を求めた。以下に、堀田第一源泉の場合についての計算過程を詳細に示す。

熱水の地下温度は、熱水の化学組成データ(表1)から Na-K-Ca 温度計により 210°Cと求まるので、蒸気表(例えば、日本機械学会、1968)からその温度での熱水のエンタルピーは 898 kJ/kg と求まる。一方、地表湧出時の温度 97°Cにおける熱水と水蒸気のエンタルピーはそれぞれ 406 kJ/kg, 2671 kJ/kg であり、エンタルピー保存式より蒸気比を χ とすると次式が成り立つ。

$$898 = 2671 \times \chi + 406 \times (1 - \chi)$$

$$\text{よって、} \chi = 0.217, \quad 1 - \chi = 0.783$$

熱水流出量は 20.6 L/分(表1)であったので、水蒸気放出量の全量は次のように求まる。

$$\text{水蒸気の放出全量} = \left(\frac{0.217}{0.783} \right) \times 20.6 = 5.7 \text{ L/分}$$

他方、凝縮水の放出量は 25 mL/分であり、これを気体の状態方程式を用いて水蒸気にもどすと次のようになる。

$$\frac{25}{18} \times 0.082 \times (273 + 17) = 33 \text{ L/分}$$

堀田地区の噴気の新凝縮ガス組成は約 3% (大沢, 2000) なので, 新凝縮ガスの放出量の全量は次の式で求められる.

$$33 \times \frac{3}{97} \times \frac{5.7}{0.025} = 233 \text{ L/分}$$

以上より, 熱水, 凝縮水, 新凝縮ガスのそれぞれの放出量の全量が求まったので, これらにそれぞれの Rn 濃度 (表2) を掛けることで, 以下のように Rn 放出量が求まる.

$$\begin{aligned} \text{熱水} &: 0.39 \text{ (Bq/L)} \times 20.6 \text{ (L/分)} = 8.0 \text{ Bq/分} \\ \text{凝縮水} &: 2.9 \text{ (Bq/L)} \times 5.7 \text{ (L/分)} = 16.5 \text{ Bq/分} \\ \text{新凝縮ガス} &: 14 \text{ (Bq/L)} \times 233 \text{ (L/分)} = 3300 \text{ Bq/分} \end{aligned}$$

計算により得られた数値を用いて, 沸騰前の熱水中の Rn 濃度を求めると次のようになる.

$$\frac{\text{Rn 放出量の合計}}{\text{熱水と蒸気の放出量の和}} = \frac{3300 + 8.0 + 16.5}{20.6 + 5.7} = 126 \text{ Bq/L}$$

さらに, 沸騰前の熱水から蒸気へ移った Rn の割合を上述の熱水, 凝縮水, 新凝縮ガスとともに流出する Rn 量から計算すると, 下記のようになる.

$$\frac{\text{蒸気にもなう Rn の放出量}}{\text{全 Rn 放出量}} = \frac{3300 + 16.5}{3300 + 16.5 + 8.0} \times 100 = 99.8 \%$$

同様の方法で火売泉源の沸騰前の熱水中の Rn 濃度を求めると 0.092 Bq/L となり, 堀田第一と同様にして熱水から蒸気に移った Rn の割合を計算すると 82.6 %となるが, 新凝縮ガスのデータが入手できていないため, 実際はこれらの値よりさらに高い溶存濃度, 移動率になるはずである.

4-2. Rn と Ra の関係性について

堀田第一と火売のそれぞれの泉源について熱水の沸騰前後の Rn と Ra の濃度関係を表した図を, 図3に示す. 図中の斜めの直線は, 永続平衡時の Rn と Ra の濃度関係を示す線である. この直線より上の領域に (Rn, Ra) のデータ・ポイントがプロットされると, Ra の放射壊変では説明できない過剰の Rn が熱水中に存在することを表し, 堀田第一も火売も Rn 過剰の状態にあることを明示している. なお, 火売における沸騰前の熱水中の推定 Rn 濃度には, 蒸気凝縮水分の補正しか施されておらず, 新凝縮ガス分の補正が加わればさらに値は大きくなる (高 Rn 濃度側にプロットされる) はずである.

このような Ra との放射平衡以上の過剰の Rn が存在する状態は, 実は, 沸騰泉に限らず別府の温泉全般に見られる関係である (古賀ほか, 1956). また, このような Rn 過剰の関係は放射能泉で良く見受けられることで (例えば, 堀内・村上, 1978), 長年議論が重ねられてきた. しかし, その理由は未だに明確にされておらず, 解決すべき温泉科学上の重要な問題であ

るため、放射能泉が存在しない別府温泉においても Rn と Ra の研究は十分に行う意味がある
と考える。

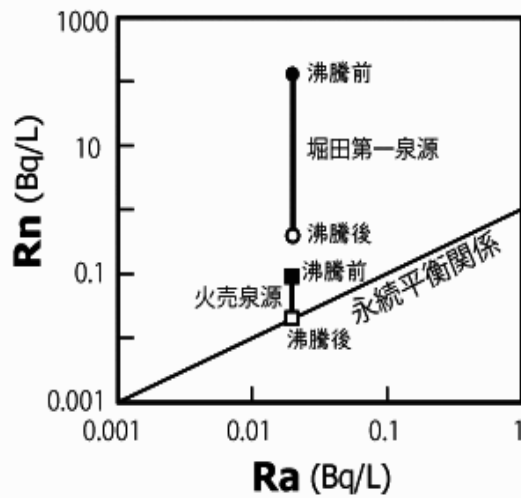


図3 研究対象の沸騰泉の Rn と Ra の関係

5. まとめ

別府温泉において、沸騰泉（地下の高温の熱水が浅部への上昇減圧によって沸騰し、地表に熱水と噴気の混合流体として流出するもの）の Rn に注目した地球化学的研究を行った。本研究では、新たな取り組みとして熱水と噴気を同時に取り扱い、採取試料の Rn 濃度のほかに流出量観測を行うことで、沸騰前に熱水中に含まれていた Rn 量を計算し、地下熱水の沸騰ともなう Rn の挙動を定量的に捉えることを計画した。また、地下の沸騰前の熱水中における Rn と Ra の関係性について地球化学的な解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 地表で沸騰泉となる地下熱水中の Rn のほとんど（最大で 99%）が、沸騰によって発生する水蒸気中に移動する。沸騰泉の熱水は Rn に対して“出涸らし”であることが明らかになるとともに、まだ数例ではあるが、別府温泉の地下の熱水には思いもよらない多量の Rn が溶存することが示すデータが得られた。なお、沸騰以前の熱水中の Rn 濃度の推定に必要なパラメータの一つに噴気（分離蒸気）のガス組成があるが、本研究では研究対象泉源周辺の蒸気井のデータ（大沢，2000）を援用しており、より正確な推定には分離蒸気のガス分析を行う必要があることを付記しておく。
- (2) 沸騰泉を形成する地下の熱水中には、Ra との放射平衡関係では説明できない過剰の Rn が含まれる。この過剰 Rn の存在は、既往研究（例えば、古賀ほか，1956）における多くの温泉（自然噴出の沸騰泉や一般温泉）にも認められる関係であり、今後これらを包括的に説明する水文化学過程を提案する必要がある。

謝辞

現地観測と試料採取は、泉源の所有者や管理者の方々のご理解のもと円滑に行うことができました。また、公益財団法人日本分析センターには Ra の分析でご協力いただき、公益財団法人大分県薬剤師会からは公表された論文（炭本・中渡瀬，2013）の内容への質問に対して詳しくご教示頂きました。これらの方々に心からお礼申し上げます。

参考文献

- 堀内公子，村上悠紀雄（1978）ラジウム，ラドン量より求めた δRn 項による鉱泉中の過剰量ラドンの存在にたいする一考察．地球化学，**12**，59-70.
- 堀内公子（1981）日本の温泉の放射能．温泉科学，**31**，69-78.
- 岸田立（2019）ラドン曳航調査による別府湾沿岸における海底温泉湧出の検出．京都大学大学院理学研究科 修士論文，40p.
- 古賀昭人，野崎秀俊，川上弘泰（1956）別府温泉の化学的研究（第5報）別府温泉の放射性元素．日本化学雑誌，**78**，642-646.
- 古賀昭人（1983）地熱系のラドンの起源と行動．大分県温泉調査研究会報告，**34**，1-9.
- 日本機械学会（1968）蒸気表，116p，社団法人日本機械学会，東京.
- 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，網田和宏，山田誠，風早康平（2010）宮崎平野の大深度温泉井から流出する地熱流体の地化学特性と起源．温泉科学，**59**，295-319.
- 炭本悟朗，中渡瀬真樹（2013）噴気泉中のラドン調査．大分県温泉調査研究会報告，**64**，43-46.
- 山本政儀，富田純平（2015）放射能と温泉．温泉科学，**64**，388-401.
- 由佐悠紀（2012）温泉・湯けむりの自然科学的概要，文化的景観 別府の湯けむり景観保存計画，p47-p67，別府市.

別府南部における不圧地下水位の周期変動解析

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

梁 熙 俊・柴 田 智 郎

要旨

不圧地下水の比較的深い地下水位の周期的な変動要因を明らかにするため、地下水位と気圧の関係を調べた。地下水位は1~5cmの変動幅を持って周期的かつランダムに変化し、気圧に対して負の相関関係を示した。地下水位の振幅スペクトルは地球潮汐に卓越するM₂とO₁分潮を示さず、地球潮汐は地下水位の変動に大きく影響を及ぼさないが、大気の変動スペクトルの特徴である8時間、半日、一日周期の周波数に相関があることから、大気圧が地下水位の周期変動の原因であることを明らかにした。

1. はじめに

地下水位に影響を及ぼす主な要因として、気圧、潮汐、降雨などが挙げられる。一般に、不圧地下水位は降雨による涵養の影響を受けやすいが、気圧や潮汐の変化は受けにくい。気圧は地表面を通して地層や岩石を変形させ、帯水層に作用する。開口した観測井の水位は、帯水層中の間隙水圧と井戸水位上の気圧の釣り合いの状態を反映して変化するため、気圧が上がると地下水位は低下、気圧が下がると地下水位は上昇し、その影響は数10cmである(板寺, 1999)。

一方、月や太陽の引力によって生じる起潮力は、海洋潮汐を引き起こすだけでなく、地球の固体部分に作用し、地殻を変形させる(地球潮汐)。地球潮汐は岩石の空隙を満たす地下水の間隙水圧に影響を及ぼし、地下水位の変化として観測される。海洋潮汐のみならず地球潮汐も、およそ12時間25分(M₂分潮)と24時間50分(O₂分潮)の2つの周期が卓越しており、周期的な変化を示し、水位変化の振幅は数~数10cmである(板寺, 1999)。また、地球潮汐による地下水位変化は被圧帯水層に顕著に現れ、不圧帯水層の変化は小さい(小泉, 1994)。例えば、不圧地下水の場合の水位変化(dh)は、

$$dh = -(\Delta\varepsilon/n)b \quad (1)$$

と表され(Bredehoeft, 1967)、 $\Delta\varepsilon$ は体積歪変化、 b は不圧帯水層の厚さで n はその空隙率である。一般的な値として、 $b=50\text{m}$ 、 $n=0.3$ 、 $\Delta\varepsilon=10^{-8}$ を代入すると、水位変化の振幅は0.017mmとなり、検出は極めて困難となる。しかし、地下水位が深い(不飽和層が厚い)場合は、不飽和層を通じた浸透や圧力伝播の過程が無視できなくなり、地下水位が浅い不圧地下水の水位変動とは異なることが知られている(由佐, 1979)。つまり、地下水位が深くなると、地下の自由水位面での圧力が大気圧と等しくなるのに時間がかかり、観測井の水位と不圧帯水層の水位に圧力差が生じ、水位が変化する(Yusa, 1969)。そこで本論文では、京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設にある2つの地下水位が深い不圧地下水において地下水位の連続観測を行い(図1)、深い地下水位の周期的な変動に影響を及ぼす要因を明らかにするために、2観測井で観測した地下水位と気圧の時

系列データを用いて、スペクトル解析を行った。

2. 観測と解析方法

本研究の調査項目は、大気圧と2つの観測井（0W1と0W2）の地下水位である。地下水位は、観測井の地下水位から3m下に地下水位ロガー計（CTD-diver, 大起理化工業社製）を設置し、大気圧は観測井内の蓋下に大気圧ロガー計（BAR0-diver, 大起理化工業社製）を設置した。なお、観測間隔は10分であった。地下水位ロガー計は圧力センサーで絶対圧力を記録する。絶対圧力はロガー上部の水圧と大気圧を足したものであるため、大気圧校正を行い、大気圧変化による影響を取り除いた。校正された絶対圧力は、ロガー計設置（またはデータ回収）の時に測定した地下水位データを元に、線形回帰式から地下水位に変換した。

深い地下水位を持つ不圧地下水は、気圧変化に応答することが知られており（Yusa, 1969）、観測された2つの観測井の地下水位の周期的な変動を確認するため、スペクトル解析（フーリエ変換より）を行った（Bendat and Piersol, 1991; 梁ほか, 2015）。スペクトル解析に用いた地下水位、降雨量、気圧は2017年8月19日00時から2018年7月23日23時までの1時間間隔のデータで、計8,136個である。フーリエ変換の離散時間表現は下記の式で定義される。

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left(-i \frac{2\pi kn}{N}\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

ここで、 X_k ：離散時系列 x_n のフーリエ変換、 N ：離散時系列の数、 i ：虚数 $i = \sqrt{-1}$ である。

気圧と地下水位の周期変動の遅れの有無を確認するため、相互相関関数を用いて気圧変動に対する地下水位変動の、時間差を求めた。相互相関関数（ $C_{xy}(k)$ ）は下記の式で表される。

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (3)$$

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

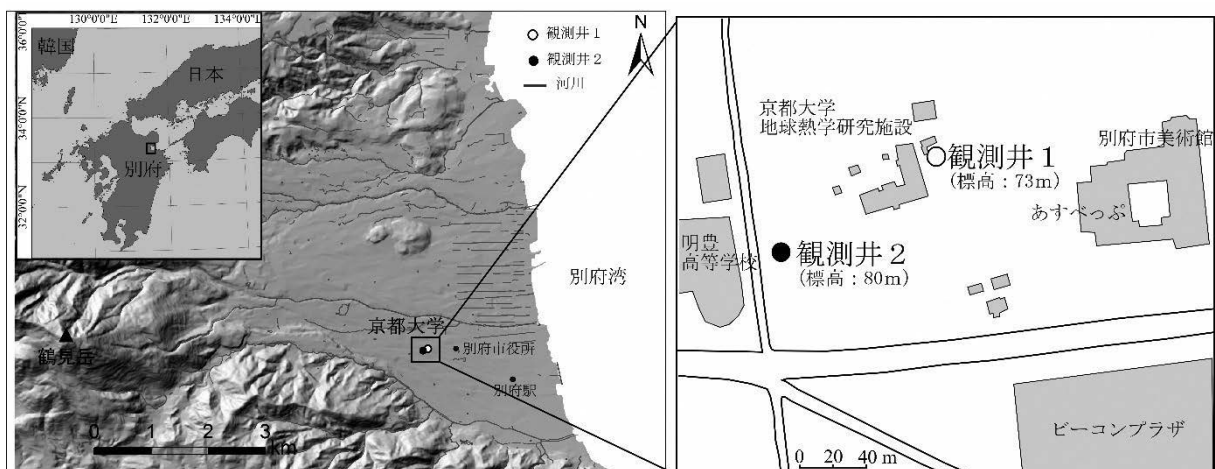


図1 調査地域および観測井の位置図

ここで、 n は観測数であり、 \bar{x} と \bar{y} は、時系列 x_t （地下水位）と y_t （気圧）の平均値である。 k は位相差であり、 t は時間（hour）、 $r_{xy}(k)$ 相互相関係数である。なお、 σ_x と σ_y は、それぞれ x_t と y_t の標準偏差である。なお、各データは、FFT(Fast Fourier Transform)ハイパスフィルター（遮断周波数：0.035cph）を用いて季節成分を取り除き、相互相関解析を行った。

3. 結果および考察

2017年8月19日00時から2018年7月23日23時における降水量、地下水位と気圧の変動を図2aと2bに示す。なお、降水量は気象庁の気象統計情報を用いた（気象庁，2019）。地下水位は平均海水位を基準とした標高（a. s. l.）で表すと、観測期間中の地下水位は約39~44m a. s. l.の間で季節変動を示している（図2b）。観測井1および2の標高値は、それぞれ約73mおよび80mであるので（図1）、少なくとも観測井1および2の不飽和層の厚さは約29mおよび約36mとなる。一般的な不圧地下水の不飽和層の厚さは数m程度なので、本観測井の不飽和層は厚いことが分かる。降水量は8月と10月末にかけて集中しており、地下水位は2017年10月末から速やかに上昇し、12月末で最も高い水位を示したのち、2018年6月末にかけて緩やかに低下した（図2b）。な

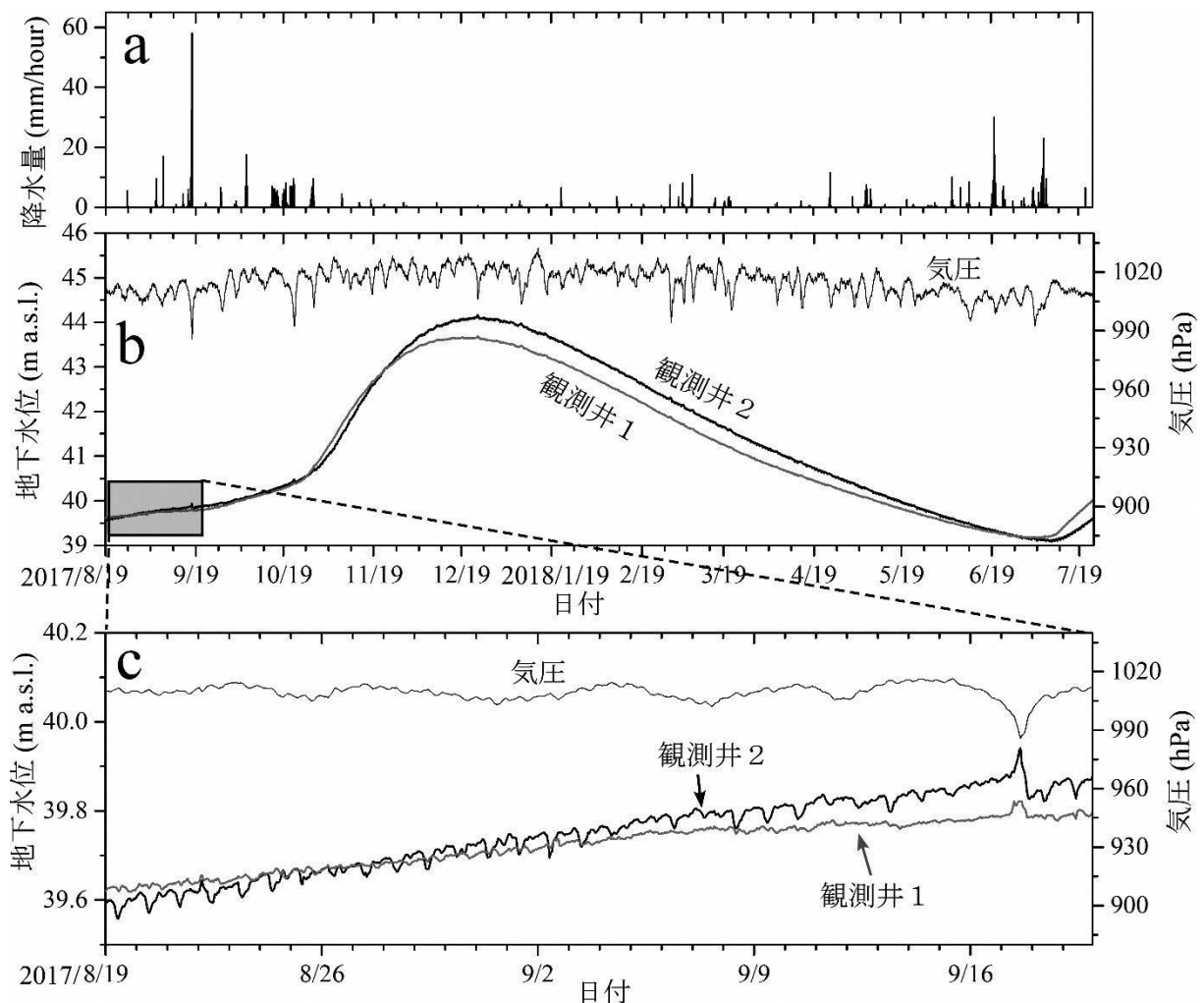


図2 全観測期間における降水量：a，地下水位と気圧の変動図：b，および8月19日から9月19日間の地下水位と気圧の変化：c

お、速やかな地下水位の上昇は、夏季の降水による涵養量の積算によるものが考えられ、地下水位は約 4m 上昇する。

本調査期間中の降水は 2017 年 9 月 16 日から 17 日にかけて最も集中しており、その降水量は合計 313.5mm であった。この期間において、地下水位は上昇し、気圧は低下した (図 2c)。また、観測井 2 の地下水位は 1~5cm の変動幅を持って周期的に変動したが、観測井 1 の地下水位は 1cm 程度の相対的に小さい変動幅を持って周期的かつランダム的に変化した。

地下水位、気圧の周期変動を確認するためにフーリエ変換を行い、その結果を図 3 に示す。観測井 1、観測井 2、気圧は 8 時間周期、12 時間周期、24 時間周期に顕著な振幅スペクトルを示した。一般に潮汐には数多くの分潮が存在しているが、本稿では主要 4 分潮を対象として解析を行った (O_1 , K_1 , M_2 , S_2 分潮)。 O_1 分潮は主太陰日周潮で、周期 (周波数: 単位は cph (cycle/hour)) は 25.819 時間 (0.0387), K_1 分潮は日月合成日周潮で、周期は 23.934 時間 (0.0419), M_2 分潮は主太陰半日周潮と呼ばれ、周期 (周波数) は 12.420 時間 (0.0806) であり、 S_2 分潮は主太陽半日周潮で、周期は 12.000 時間 (0.0833) である。

大気潮汐は太陽の日射により大気が加熱されることに起因し、半日周期が卓越する。大気による加熱量は正弦波のような周期変動以外にも、日の出・日没とともに急増減する形をとることが原因で、一日周期、8 時間周期、6 時間周期などの変動が生まれる。なお、天文潮と区分するために熱潮汐と呼ばれる。観測井 1 と観測井 2 の地下水位には 8 時間周期、12 時間周期、24 時間周期に顕著な振幅スペクトルがあり、 K_1 分潮と S_2 分潮、もしくは熱潮汐によるものと考えられる。海洋および地球潮汐では M_2 と O_1 分潮が卓越することが知られているが、本解析ではこれら分潮の周波数において顕著なピークを示さなかった (図 3)。地球潮汐は 2 つの観測井の地下水位に対して大きく影響を及ぼさないことを意味する。したがって、本稿で解析した気圧の振幅スペクトルは

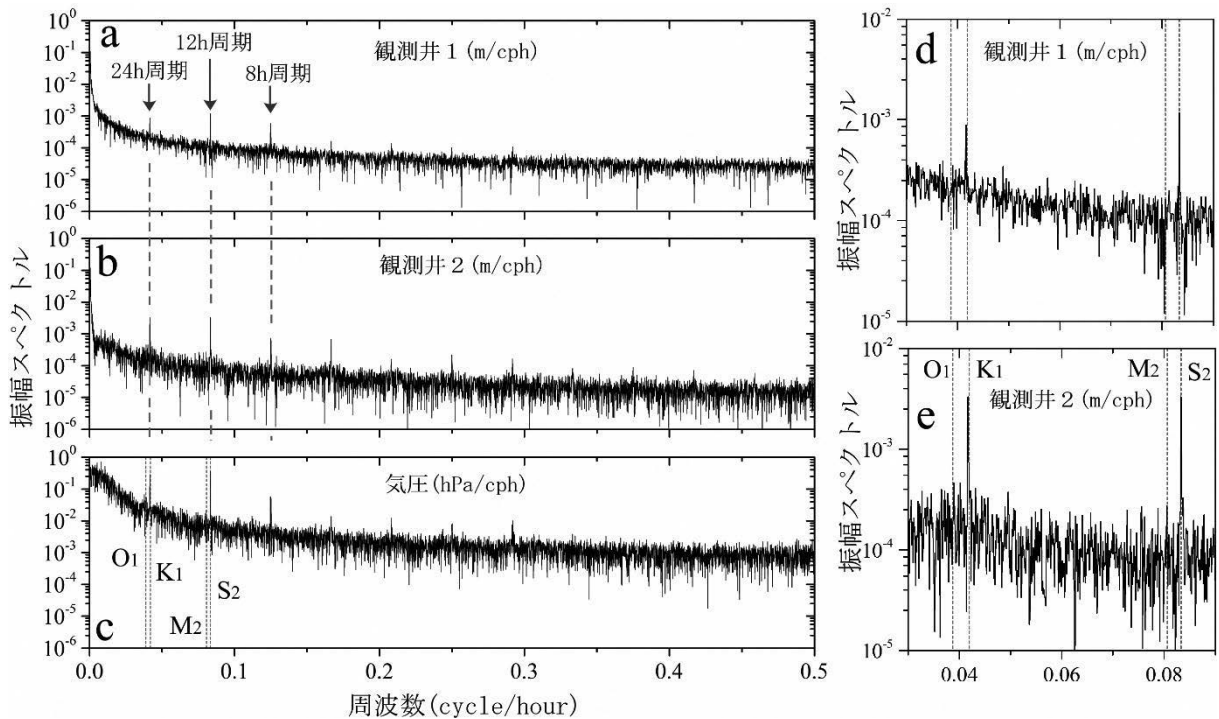


図 3 振幅スペクトル (a: 観測井 1, b: 観測井 2, c: 気圧), および周波数 0.03 から 0.09 cycle/hour のスペクトル (d: 観測井 1, e: 観測井 2)。

熱潮汐によるものと思われ (図 3c), 地下水位は熱潮汐の影響を大きく受けることが思われる. なお, 振幅スペクトルは観測井 1 より観測井 2 が大きく (図 3d と 3e), 観測井 2 は熱潮汐の影響を相対的に受けやすいことが考えられる. しかし, 他の解析手法と比較を行う等の多方面からの解析が望まれ, これらは今後の研究課題である.

気圧の変動が地下水位に影響を及ぼすことを示したが, どの程度の時間差を持って影響するかを明らかにするために相互相関解析を行った (図 4). 正の時間差は気圧に対する地下水位の遅れを, 負の相互相関係数は位相

の反転を示す. つまり, 気圧が上昇すると水位が低下することを意味する. 相互相関係数の絶対値が最も大きいものは観測井 1 では 1 時間遅れ, 観測井 2 では時間差はない (図 4). 解析時間間隔が 1 時間であるため, 1 時間以内の時間遅れを見ることは難しいが, 全体的に 1 時間以内で熱潮汐は地下水位変動に影響を及ぼすことが考えられる. 観測井 2 の方が観測井 1 より速く応答し, 高い相互相関係数を示したことは, 気圧変動の影響をより受けやすいことを示唆する.

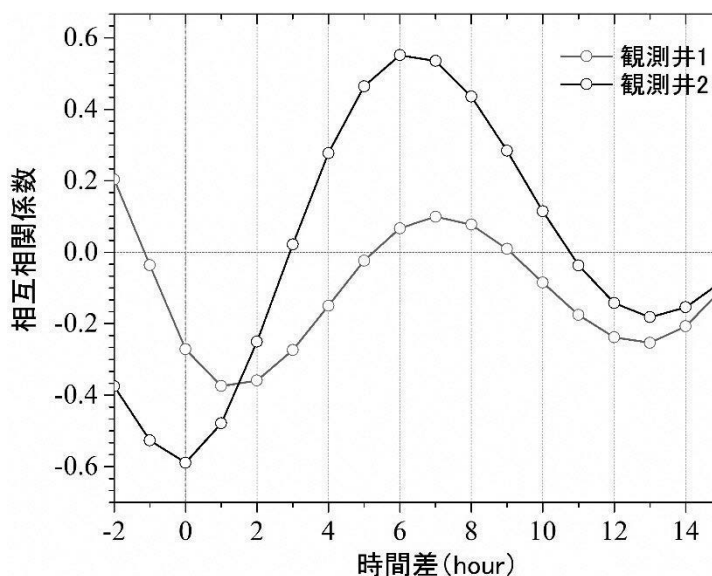


図 4 観測井 1 と観測井 2 の気圧に対する相互相関係数.

4. おわりに

別府南部における深い地下水位の周期的な変動の要因を明らかにするために京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設内の 2 つの観測井において不圧地下水位と気圧を測定した. 地下水位は 1~5cm の変動幅を持って周期的かつランダム的に変化した. 地下水位の振幅スペクトルは大気の振幅スペクトルの周波数 (8 時間, 半日, 一日周期) において顕著なピークを示し, 大気変動が地下水位の周期変動に影響を及ぼすことが示唆された. しかし, 地球潮汐に卓越する M_2 と O_1 分潮に顕著なピークを示さなかったため, 地球潮汐は 2 つの観測井の地下水位に対して大きく影響を及ぼさないことが示唆された. 気圧変動に対する地下水位変動は負の相関を示し, 遅れ時間差は, 観測井 1 で 1 時間, 観測井 2 では, 時間差はなかった. 観測井 2 の方が観測井 1 より気圧変動の影響をより受けやすいことが示唆された.

参考文献

- 1) 板寺一洋 (1999): 温泉地学研究所の観測井における地下水位変化の特徴とその補正について. 神奈川県温泉地学研究所報告, 2 (112), 57-64.
- 2) 気象庁 (2019): 気象統計情報. <http://www.jpm.go.jp/jma/> (2019. 12. 25 閲覧)
- 3) 小泉尚嗣 (1994): 地殻歪と地殻内流体. 火山, 4, 169-176.
- 4) Bendat, J.S. and Piersol A.G. (1991): Random Data, Analysis and Measurement

Procedures. Wiley, 566 p.

- 5) Bredehoeft, J.D. (1967) : Response of well-aquifer systems to earth tides. *J. Geophys. Res.*, 72, 3075-3087.
- 6) 梁 熙俊, 嶋田 純, 松田博貴, 利部 慎, 董 林堯 (2015) : 島嶼地域における地下水位の時系列解析及び電気伝導度を用いた淡水レンズ形状の評価 -沖縄県南大東島の例-. 地下水学会誌, 57 (2), 187-205.
- 7) Yusa, Y. (1969) : The fluctuation of the level of the water table due to barometric change. *Spec. Contrib. Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, 9, 15-28.
- 8) 由佐悠紀 (1979) : 深い地下水位への浸透供給過程の解析. 陸水学会誌, 40 (1), 40-48.

由布岳・鶴見岳の地球化学的研究 2

広島大学地球惑星システム学専攻

岡田 郁生・柴田 知之

1. はじめに

沈み込み帯で卓越する安山岩マグマは、多くの場合マグマ混合の影響を受けている。混合するそれぞれのマグマの起源と進化過程の解明が、安山岩マグマの成因を明らかにするためには不可欠だが、混合することによりマグマの初期情報の多くは検出困難になってしまう。この問題を解決するため、昨年度は安山岩中に斑晶状に存在する角閃石の主成分・微量元素組成から、角閃石が晶出したメルトの物理化学的特徴を抽出することを試みた。今年度は、角閃石の微量元素組成をレーザーアブレーション-誘導結合プラズマ質量分析装置 (LA-ICP-MS) での測定法の確立を行い、それを使って、角閃石のより詳細な微量元素組成分析を行った。

2. 結果と考察

LA-ICP-MS による角閃石の微量元素をより高精度に分析するため、レーザーのエネルギーと周波数を変化させ、再現性が最も高くなる組み合わせを決定した。その結果、全 26 の微量元素組成が 10%以下の再現性で測定可能となった。その方法を用いて、新たに由布岳安山岩中の角閃石の微量元素組成を測定し、昨年度のデータと合わせ、データの蓄積を行った。

由布岳安山岩中の角閃石の主要元素組成から求めた角閃石と平衡なメルトの、温度、圧力、 SiO_2 含有量や FeO^*/MgO 比から、平衡なメルトはグループ I メルト (937–998 °C, 356–624 MPa, 51.5–64.5 wt.%, 2.5–3.3) とグループ II メルト (781–865 °C, 87–229 MPa, 69.4–75.0 wt.%, 2.1–4.0) に分けられた。また、角閃石の微量元素組

成から、角閃石 - メルト間の分配係数 (Nandedkar et al. 2016) を用いて角閃石と平衡なメルトの微量元素組成を計算した結果、グループ I メルトとグループ II メルトはそれぞれ異なる組成が得られた。これらのグループは、由布岳安山岩の全岩化学組成とは異なることから、マグマ混合前のそれぞれの端成分マグマの化学組成を示すと考えることができる。推定したグループ I メルトの微量元素組成は、沈み込む海洋地殻の部分溶融が起源と考えられる大山火山 (Kimura et al. 2005) と類似する。このことから、グループ I メルトの起源は沈み込む海洋地殻の部分溶融であると考えられる。一方、グループ II メルトは、Sr/Y 比と Y 濃度の関係において、姫島火山の流紋岩と類似する。姫島火山の流紋岩は地殻物質の部分溶融が起源と考えられており (Hirayama et al., 2019), グループ II メルトも同様に地殻物質の部分溶融を起源とする可能性がある。

引用文献

- Hirayama, T., Shibata, T., Yoshikawa, M., Hayasaka Y. and Takemura K. (2019) Geochemical features of Quaternary rhyolitic magma and xenolith from Hime-shima volcanic group, Japan Geoscience Union Meeting 2019 Abstracts, SCG52 - P08.
- Kimura, J., Tateno, M. and Osaka, I. (2005) Geology and geochemistry of Karasugasen lava dome, Daisen-Hiruzen Volcano Group, southwest Japan, *The Island Arc*, 14, 115 - 136.
- Nandedkar, R. H., Hürlimann, N., Ulmer, P. and Müntener, O. (2016) Amphibole-melt trace element partitioning of fractionating calc-alkaline magmas in the lower crust : an experimental study, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171 : 71.

大分県内の火山岩類の化学組成・Sr-Nd同位体比（5） 九重山その2

広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

藤原 涼太郎・芳川 雅子
柴田 知之

京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設

柴田 智郎

京都大学

竹村 恵二

1. はじめに

大分県内には、鶴見岳・伽藍岳、由布岳、九重山の活火山がある。そのうち、鶴見岳・伽藍岳、由布岳の火山岩の化学組成・Sr - Nd同位体比を文献調査し、不足している微量元素組成・Sr - Nd同位体比を報告してきた（芳川ほか，2016）。また九重山については主要・微量元素組成を報告してきた（芳川ほか，2018）。本研究では九重山の火山岩2試料についてSr同位体（= $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）比を報告する。

2. 試料および分析方法

九重山は鶴見岳・伽藍岳、由布岳とともに火山フロント上に位置し、別府 - 島原地溝内に位置する（川辺ほか，2015）。川辺ほか（2015）は、九重火山岩を第1期から第4期までの4つのステージに区分し、それらの主要元素組成の SiO_2 - 酸化物図上での直線的なトレンドと非平衡な斑晶鉱物組み合わせなどから、苦鉄質マグマと珪長質マグマの混合を示唆している。藤原（2018）は、川辺ほか（2015）の区分に従いすべてのステージから新たに試料を採取し、川辺ほか（2015）と同様の全岩主要元素組成のトレンドを観察し苦鉄質マグマと珪長質マグマの混合を支持した。さらに、藤原（2018）は各ステ

ージの微量元素組成を初めて報告し、微量元素組成がステージ毎に系統的に変化しない事を示した。Sr 同位体比を測定する試料として、第 2 期に活動した飯田火砕流下部から採取した高 Sr/Y 比 (~35) を示す斜方輝石普通角閃石デイサイト軽石試料 18071502 と第 4 期に噴出し苦鉄質な北大船のかんらん石単斜輝石玄武岩質安山岩溶岩試料 19090905 を選んだ。試料 18071502 は斑晶組み合わせが斜長石・角閃石・両輝石・不透明鉱物で、石基はほぼガラス質である。試料 19090905 は斑晶として斜長石・かんらん石・単斜輝石・不透明鉱物を含み、石基はガラス・斜長石・カンラン石・単斜輝石・不透明鉱物で構成されている (藤原, 2018)。

Sr の化学分離法は芳川ほか (2016) に従い、Sr 同位体比は広島大学に設置された表面電離型質量分析計 (ThermoFinnigan MAT262) を用いて測定した。

3. 結果と考察

SiO₂ (wt%) - ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比図に、他の大分県の第四紀火山岩、由布岳と鶴見岳およびそれらの暗色包有物、鬼箕山のデータとともに本研究で得られた九重山の結果と Kita et al. (2001) で報告されている九重山のデータをプロットした (図 1)。九重山の ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比は Kita et al. (2001) で報告されているように 0.7043 と 0.7040 付近の値を示す試料に分かれた。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比が 0.7043 と 0.7040 を示す試料をそれぞれ高 Sr 同位体比グループ、低 Sr 同位体比グループとする。高 Sr 同位体比グループは SiO₂ 含有量 (53~64 wt%) によらずほぼ一定で、同一起源マグマの結晶分化作用で生じた可能性が示唆される。

Kita et al. (2012) は九州の第四紀火山岩が Nb/Y - ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比図 (図 2) で、初生的な島弧 (IA) タイプ、EMII 的海洋島玄武岩 (OIB) タイプ、典型的 OIB タイプ、EMII 的 OIB タイプと典型的 OIB タイプの間である中間型 OIB タイプに分類されるとした。彼らは、別府 - 島原地溝帯に噴出する火山岩は中間型 OIB タイプに、九州南部川内断層帯内に噴出する火山岩は典型的 OIB タイプに分類され、それぞれのトレンドは初生

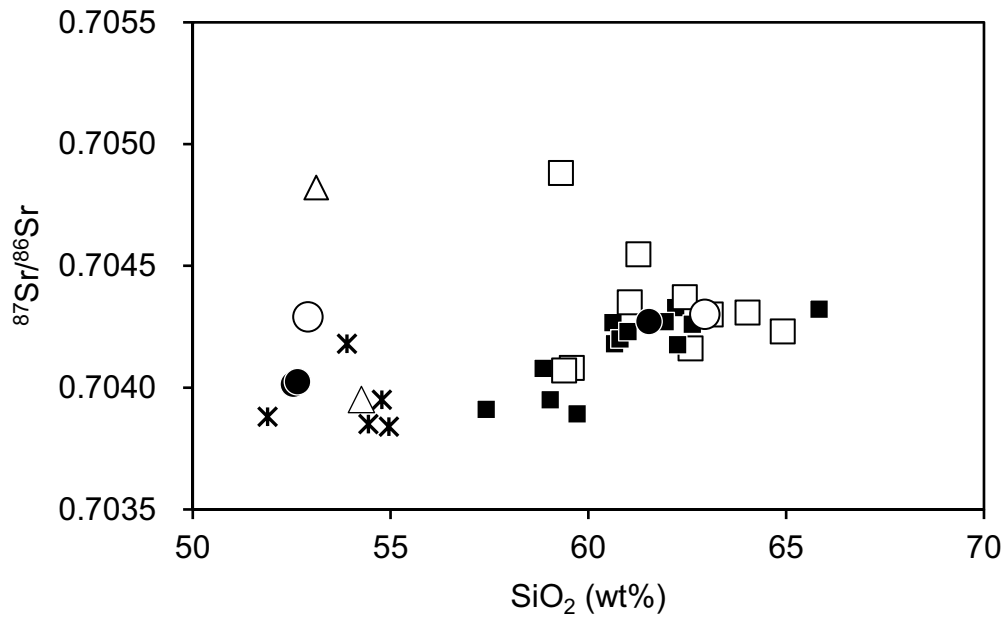


図1. SiO₂ 含有量(wt%) - ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比図.

○：九重山本研究，●：九重山報告値 (Kita et al., 2001)
 ■：由布岳，□：鶴見岳，*：由布岳・鶴見岳暗色包有物，△：鬼箕
 データは，太田・青木(1997)，Sugimoto et al. (2006)，芳川ほか(2016, 2017, 2018)による。

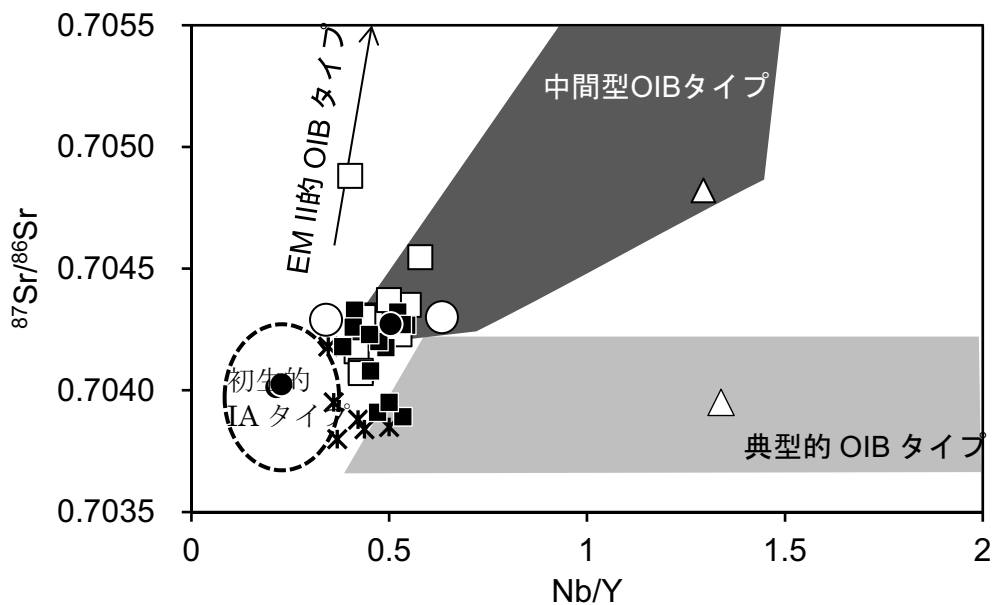


図2. Nb/Y 比 - ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比図.

初生的 IA タイプ・EM II 的 OIB タイプ・中間型 OIB タイプ・典型的 OIB タイプ
 の領域は Kita et al. (2012)による。凡例は図1. と同じ。データは，太田・青木
 (1997)，Sugimoto et al. (2006)，芳川ほか(2016, 2017, 2018)による。

的 IA タイプマグマと異なる OIB タイプマグマの混合で形成され、それぞれの領域で噴出していると考察した。さらに、別府 - 島原地溝帯と川内断層帯内の火山活動開始時期が背弧から火山フロント方向（西部から東部）に若くなる傾向と、火山岩の噴出開始時期が沖縄トラフ背弧海盆のリフティング開始時期と重なることから、典型的・中間的 OIB タイプは背弧海盆のリフティングによる中央海嶺的な OIB と EMII 的 OIB が異なる程度に混合したものであるとした (Kita et al., 2012)。しかし、高 Sr 同位体比グループは中間型 OIB タイプに、低 Sr 同位体比グループは初生 IA タイプに分類される、別府 - 島原地溝帯で噴出する火山岩であっても典型的 OIB タイプに属する試料が観察され (図 2)、典型的・中間的 OIB タイプの違いが噴出場所の違いを反映しているとはいいがたい。芳川ほか (2018) は SiO_2 - Sr/Y 図において九重山と由布岳・鶴見岳の火山岩の一部がアダカイト (スラブ溶融メルト) トレンド (Shibata et al., 2014) にプロットされることから、これらの火山岩への沈み込んだスラブの溶融メルト成分の関与を示唆している。Sr/Y - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比図では、低 Sr 同位体比グループは一部の由布岳火山岩や姫島火山岩とともに Sr/Y 比の上昇に伴い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が減少し、スラブ溶融メルトの関与が支持される。従って、OIB タイプマグマの違いはスラブ溶融メルトの関与の有無の違いかもしれない。

4. まとめ

九重山火山岩は Nb/Y - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比図で高 Sr 同位体比グループ、低 Sr 同位体比グループに分かれる。低 Sr 同位体比グループは比較的高い Sr/Y 比を示し、スラブ溶融メルト成分を含むと考えられる。

謝辞

試料採取は、阿蘇くじゅう国立公園管理官事務所の澤邦之上席国立公園管理官に便宜を図っていただいた。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 藤原涼太郎 (2018) 九州の九重火山群第四紀火成岩類の知友化学的および岩石学的特徴, 広島大学卒業論文.
- 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子 (2015) 九重火山地質図. 火山地質図, 19, 産総研地質調査総合センター
- 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. Volcano. 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.
- 太田岳洋・青木謙一郎 (1991) 由布・鶴見火山群における安山岩マグマの成因—二端成分マグマ混合モデル—, *岩鉱*, 86, 1-15.
- 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., 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.
- 芳川雅子・柴田知之・杉本健・竹村恵二 (2017) 大分県内の火山岩類の化学・Sr-Nd 同位体比 (2) 由布岳, 大分県温泉調査研究会報告, 68, 55-59.
- 芳川雅子・柴田知之・公門駿・杉本健・竹村恵二 (2016) 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.
- 芳川雅子・柴田知之・杉本健・公門駿・竹村恵二 (2018) 大分県内の火山岩類の化学・Sr-Nd 同位体比 (3) 伽藍岳・鬼箕山, 大分県温泉調査研究会報告, 67, 35-39.
- 芳川雅子・藤原涼太郎・柴田知之・柴田智郎・竹村恵二 (2019) 大分県内の火山岩類の化学組成・Sr-Nd 同位体比 (4) 九重山, 大分県温泉調査研究会報告, 70, 47-51.

別府市内の河川における河口域の底生生物分布と 温泉排水流入との関係

龍谷大学

清水 一 矢・山 田 誠
上 西 実

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

別府市を流れる二つの河川（冷川、平田川）の感潮域、非感潮域において、温泉排水の流入と底生生物分布の関係を調査する目的で底生生物の調査を行った。各々の河川の感潮域、非感潮域において1 m四方のエリアをランダムに10地点設定し、サンプルとなる底生生物（甲殻類・貝類）を採集した。その結果、河川の物理的環境や温泉排水の流入の有無により生息種や生息数に大きな差が生じる可能性があることが示唆された。また、温泉排水の流入がある河川では温水を好む貝類が生息していることが明らかとなった。

1. はじめに

大分県別府市は、非常に多くの源泉が存在し、温泉の湧出量も非常に多い地域である。人々は浴用や熱利用のような形で温泉の恩恵を被っている。またそれら温泉資源は観光資源としても非常に有用であり、国内観光客の消費やインバウンド消費にも大きな役割を果たしている。一方で、別府市は温泉の湧出地と河川の位置が非常に近接しており、大沢 他（2007）では「温泉排水が規則で定める温度（摂氏 45℃）をこえるときは、暗渠（地下に設けた水路）により排水しなければならない。」という別府市環境保全条例について言及されており、沸騰泉のような高温の温泉から流出する余剰温泉水などが水路や河川にそのまま流出していることが明らかとなっている。また、そのような温泉排水が河川や沿岸域の生態系に影響を与えている可能性が既往研究によって示唆されている。Yamada et al. (2017) は、温泉排水の流入が非常に多い平田川で、季節を問わず熱帯性外来魚であるナイルティラピアの生息が確認でき、熱帯性の外来魚が生息・繁殖できる環境、すなわち河川の水温が一年を通して高い環境を温泉排水が形成していることを明らかにし、温泉排水が河川の生態系に大きな影響を与えていることを示唆した。

このように、温泉排水が河川へ流入し、河川や河口域の生態系に影響を与えていることは明らかとなってきているが、前述の研究では魚類を主な対象としてその影響について論じており、その他の生物についてはほとんど言及されていない。河川や沿岸域には様々な生物が生息していることは周知の事実であるが、特にそこに生息する底生生物は、底質の汚染や粒度組成により、独特な生物群等を形成することが知られており、生物指標の一つとして用いられている（環境省, 2017）。つまり、底生生物の生息状況を知ることは、該当水域の生態系への影響の大きさを知るための研究の足掛かり的な意味合いを持つ。

そこで本研究では、温泉排水が沿岸生態系へ及ぼす影響についての研究の基礎資料を得る目的で、大分県別府市の主要な河川のうち、温泉排水の流入が顕著な河川（平田川）と、温泉排水の流入がない河川（冷川）の河口域の感潮域と非感潮域において、底生生物、特に甲殻類（エビ・カニ類）と貝類の生息数や生息種の違いについて調査を行った。

2. 調査地概要および調査・分析方法

調査対象とした河川は、冷川、平田川の2河川である。これら2河川は別府市内を西から東に流れたのち別府湾に流れ込む。冷川は流域付近に温泉の湧出地がほとんどなく、温泉排水の影響をほぼ受けていない河川である。本河川の下流部の河床は、非感潮域と感潮域の境目部分をのぞいて、ほぼ自然の状態である。また、温泉排水の影響を受けていないため、1年を通して平田川よりも水温が低く、熱帯性の外来種は確認されていない (Yamada et al., 2017)。

平田川は流域内に鉄輪温泉と呼ばれる温泉地があり、温泉排水の影響を色濃く受けている河川である。そのため、年中水温が高く、熱帯性の外来魚であるナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) が季節を問わず確認されている (Yamada et al., 2017)。また、平田川の流路のほとんどはコンクリート三面張りになっており、感潮域の直前まで河床はコンクリート張りで、感潮域の河床は砂礫となっている。

調査は、これらの河川の非感潮域最下流部および感潮域最上流部で行った (図1) (冷川の非感潮域地点は大潮の時には潮が上がってくる地点だが、便宜上非感潮域とした)。調査の期間は2019年8月21日、22日の2日間で、それぞれの河川の感潮域と非感潮域、計4か所において、地点ごとに1m四方の範囲を10カ所ランダムに設定し、それらの範囲内の生物を手網を用いて採集した。その後採集したサンプルを各地点の10カ所別々にまとめ、アルコールで固定して研究室へと持ち帰り、研究対象となる底生生物 (甲殻類・貝類) を選別して種同定を行った。

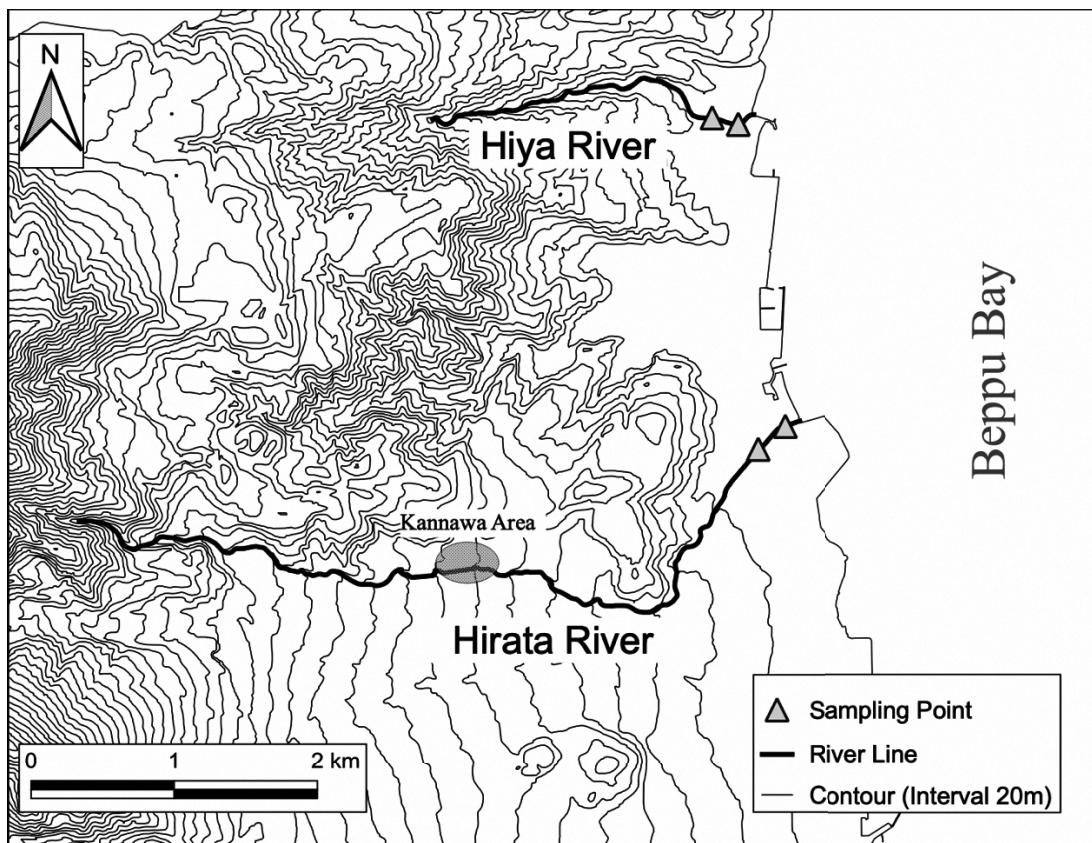


図1 調査対象河川と調査地点

3. 調査結果

採集した試料の種同定を行った結果を表1に示した。

3.1. エビ類について

採集されたエビ類はスジエビモドキ(*Palaemon seriffer*)とスナモグリ(*Callinassa petalura*)とテッポウエビ科(Alpheidae)の一種、トゲエビジャコ(*Synchrangon angusticauda*)とヌマエビ科(Atyidae)の一種とミナミテナガエビ(*Macrobrachium formosense*)の計6種類であった。そのうち、冷川ではスジエビモドキ、スナモグリ、テッポウエビ科の一種、トゲエビジャコ、ヌマエビ科の一種が、平田川ではスジエビモドキ、ミナミテナガエビがそれぞれ採集された。また、個体数としては、冷川では、スジエビモドキが16個体、スナモグリが1個体、テッポウエビ科の一種が6個体、トゲエビジャコが1個体、ヌマエビ科の一種が2個体採集され、平田川では、スジエビモドキが95個体、ミナミテナガエビが1個体採集された。両河川ともスジエビモドキの採集数が多かったものの、1cm未満の個体がかなり多く見られた。スナモグリ、テッポウエビ科の一種、トゲエビジャコ、ヌマエビ科の一種はそのほとんどがスジエビモドキ同様小さな個体であった。ミナミテナガエビは特徴である模様がはっきりと確認できる成熟した個体が採集された。

3.2. カニ類について

採集されたカニ類はイワガニ科(Grapsidae)の一種とチゴガニ属(*Ilyoplax*)の一種とベンケイガニ(*Sesarmops intermedium*)、モクズガニ科(Varunidae)の計4種に加え種判別不可なものも採集された。そのうち、冷川ではイワガニ科の一種とチゴガニ属の一種とベンケイガニ、モクズガニ科、さらに不明種が、平田川ではモクズガニ科と不明種が採集された。また、個体数としては、冷川ではイワガニ科が1個体、チゴガニ属が2個体、ベンケイガニが1個体、モクズガニ科が194個体、不明種が8個体採集され、平田川ではモクズガニ科が6個体、不明種が1個体採集された。イワガニ科、ベンケイガニは甲長4cmほどの個体で、チゴガニ属は甲長1cmに満たない個体であった。モクズガニ科は甲長1cmに満たないものから5cmほどに及ぶものまで幅広いサイズの個体が採集された。

3.3. 貝類について

採集された貝類はイシマキガイ(*Clithon retropictus*)とサカマキガイ(*Physa acuta*)とスクミリンゴガイ(*Pomacea canaliculata*)とカワニナ(*Semisulcospira libertina*)、ヌノメカワニナ(*Melanoides tuberculata*)の5種類が採集された。そのうち、冷川ではイシマキガイとカワニナ、ヌノメカワニナが採集され、平田川ではイシマキガイとサカマキガイとスクミリンゴガイとカワニナ、ヌノメカワニナが採集された。なお、採集された貝類のうち、サカマキガイ、スクミリンゴガイ、ヌノメカワニナの3種は外来種である。また、個体数としては、冷川ではイシマキガイが559個体、カワニナが25個体、ヌノメカワニナが2個体採集され、平田川ではイシマキガイが49個体、サカマキガイが6個体、スクミリンゴガイが1個体、カワニナが1個体、ヌノメカワニナが11個体採集された。イシマキガイ、カワニナは1cmに満たないものから3~4cmほどのものまで幅広いサイズが採集された。サカマキガイ、スクミリンゴガイは1cmに満たない小さな個体が採集され、ヌノメカワニナは1cmほどの個体が多く採集された。

表 1 各調査地点で採集された生物種と個体数

エビ類	冷川		平田川		合計（種別個体数）
	非感潮域	感潮域	非感潮域	感潮域	
	スジエビモドキ	5	11	1	
スナモグリ	0	1	0	0	1
テッポウエビ科	0	6	0	0	6
トゲエビシャコ	0	1	0	0	1
ヌマエビ科	2	0	0	0	2
ミナミテナガエビ	0	0	1	0	1
合計（総個体数）	7	19	2	94	122

カニ類	冷川		平田川		合計（種別個体数）
	非感潮域	感潮域	非感潮域	感潮域	
	イワガニ科	1	0	0	
チゴガニ属	0	2	0	0	2
ベンケイガニ	0	1	0	0	1
モクズガニ科	70	124	0	6	200
その他（不明種）	0	8	0	1	9
合計（総個体数）	71	135	0	7	213

貝類	冷川		平田川		合計（種別個体数）
	非感潮域	感潮域	非感潮域	感潮域	
	イシマキガイ	508	51	9	
サカマキガイ	0	0	6	0	6
スクミリンゴガイ	0	0	0	1	1
カワニナ	25	0	1	0	26
ヌノメカワニナ	0	2	11	9	22
合計（総個体数）	533	53	27	50	663

3.4. 冷川と平田川の生息種と生息数の違い

冷川で採集された生物種は計 13 種であり（種判別不可なものを除く）、平田川と比べて多く見られた種はモクズガニ科、イシマキガイ、カワニナであった。平田川で採集された生物種は計 8 種であり（種判別不可なものを除く）、冷川と比べて多く見られた種はスジエビモドキ、ヌノメカワニナであった。両河川を比較すると、冷川の種数は平田川のおよそ 1.6 倍多く、また、個体数もおよそ 4.5 倍多い結果となった。

感潮域と非感潮域別に見ると、冷川では、非感潮域でのみ採集された種はヌマエビ科の一種、イワガニ科の一種、カワニナの 3 種で、感潮域でのみ採集された種はスナモグリ、テッポウエビ科の一種、トゲエビシャコ、チゴガニ属の一種、ベンケイガニ、ヌノメカワニナの 6 種であった。また、採集数については、非感潮域ではイシマキガイが、感潮域ではモクズガニ科がそれぞれ

多かった。平田川の非感潮域でのみ採集された種はミナミテナガエビ、サカマキガイ、カワニナの4種、感潮域でのみ採集された種はモクズガニ科、スクミリンゴガイの2種であった。採集数については、非感潮域ではヌノメカワニナが、感潮域ではスジエビモドキがそれぞれ多かった。

4. 考察

4.1. 地点間での甲殻類の生息数の差を生じさせる要因に関する一考察

上述の通り、両河川の感潮域では、スジエビモドキやモクズガニ科などの甲殻類が非常に多く見られ、冷川の非感潮域でもモクズガニ科が多く見られた。一方で、平田川の非感潮域は甲殻類の採集個体数はその他の地点と比べて非常に数なかった。平田川の非感潮域はコンクリート三面張りとなっており、人工的に段差が設けられ、水生植物などが生育しづらい環境ができている。また、礫などもほとんどなく、甲殻類にとっては身を隠す場所もあまりないことから非常に不向きな生息環境となっている。一方で、両河川の感潮域と冷川の非感潮域は河床が自然の環境となっており、甲殻類の生息環境としては適している。これらのことが、甲殻類の生息数への影響の一因となっている可能性が高い。

平田川と冷川では、前者はスジエビモドキが、後者はモクズガニ科が多かった。スジエビモドキは海域に生息する種である。平田川の感潮域地点は、海に直線的につながっており、海部に曲線的につながっている冷川と比べて海水が容易に入り込む構造になっている。海域に生息する種であるスジエビモドキが平田川感潮域に多かったことは、このような構造がその要因のひとつとなっている可能性が考えられる。一方、モクズガニ科の生息数の違いについては、スジエビモドキの生息数に差が出た要因とは異なる要因の可能性が高い。小林(1999)はモクズガニについて、「淡水域においては砂、泥、岩、コンクリートなどいずれの底質にも生息でき、清冽な渓流域からミズワタが生え硫化水素が泥に溜まった富栄養な水域まで、流れさえあれば幅広い水質域で生息している」、「モクズガニは感潮域で繁殖を行い、さらに海域を分散することで他の河川に分布する個体群へ新規加入個体が補給され、淡水域での生息環境に対する選好性もそれほど強くない」と述べている。したがって、近接する2つの河川間の水質や河川構造の差が生息数の差を著しく生じさせる理由とは考えにくい。しかし水温に着目すると、モクズガニの最適水温域は10℃~30℃で、適水温域は5℃~35℃とされている(国土交通省都市・地域整備局下水道部2002)。平田川の水温は夏期には35℃を超える場合もあり(Yamada et al. 2017)、水温としては生息するには若干不適であることがわかる。つまり、温泉排水による河川水温上昇が、平田川と冷川の感潮域でモクズガニ科の生息数に大きな差を生じさせる一因となっている可能性が考えられる。

4.2. 地点間での貝類の生息数の差を生じさせる要因に関する一考察

イシマキガイはすべての地点で採集され、その採集数も多かったが、採集総数のおよそ80%が冷川の非感潮域で採集された。イシマキガイは観賞用水槽の掃除屋として飼育される例が多く、いくつかのアクアリウム関連のWebサイトでは10℃~28℃程度が適水温であるとされている。現時点でははっきりとした適水温の情報を得られていないが、このような情報を勘案すると、冷川の非感潮域が最も採集数が多い理由に水温が関係しているのではないかと推察される。

一方、カワニナ類については、カワニナのほとんどが冷川の非感潮域で採集されており、ヌ

ノメカワニナのほとんどは平田川の非感潮域と感潮域で採集された。カワニナは生物による水質評価指標としては高いスコアであり、水質の良好な場所に生息するとされている（環境省 2017）。一方、ヌメカワニナは、世界各地の亜熱帯から熱帯地方にかけて広く分布するコスモポリタン種で（川瀬ほか 2018）、国内においても温排水の流入が顕著な場所での生息確認が報告されている（中井ほか 1994）。つまり、カワニナ類についても、温泉排水の流入による水質の変化や河川水温上昇が、それらの生息数に影響を与えていると考えられる。

5. まとめ

大分県別府市の温泉排水が流入している河川としていない河川の河口部で底生生物の生息種数調査を行った結果、以下のことが明らかとなった。

河口域の甲殻類の生息種と数は、河川の物理的構造に影響を受けている可能性が示唆された。また、甲殻類・貝類ともに、温泉排水の流入がその生息数と生息種に影響を与えていることが示唆され、河川における底生生物の生態系に強い影響を与えている可能性があることがわかった。特に、温水を好むヌメカワニナのような種が実際に生息していることが確認でき、先行研究で示されていた、高水温環境を好む魚類だけでなく、高水温環境を好む底生生物の生息条件も整っているということが明らかとなった。

今回の調査結果により、河川河口域に生息する底生生物への温泉排水の影響についての基礎的な情報を得ることができた。しかし、実際に生体へ与えている影響の程度や内容などの定量的な情報はまだまだ不足している。そのようなことを明らかにするためには、河川水質や生体を取り込んでいる物質に関する調査など、より細かい視点での調査が今後必要となってくるであろう。

謝辞

本報告で行った調査にあたり、サンプル採集の作業にご協力いただいた龍谷大学環境サイエンスコースの竹下虎之介氏、今西駿太氏、瀧沢恭矢氏に感謝いたします。また、調査道具等、調査に関わる準備に関してご協力賜りました京都大学大学院理学研究科付属地球熱学研究施設の三島壮智氏に感謝いたします。

参考文献

- 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 2007; 58: 21-30.
- Yamada M, Shoji J, Ohsawa S, Mishima T, Hata M, Honda H, Fujii M, Taniguchi M. (2017) Hot spring drainage impact on fish communities around temperate estuaries in southwestern Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 69-83.
- 環境省水・大気環境局 (2017) 水生生物による水質評価法マニュアル -日本版平均スコア法-, 環境省, 36p.
- 小林哲 (1999) モクズガニ *Eriocheir japonica* (de Haan) の繁殖生態(総説), 日本ベントス学会, 54, 24-35.
- 国土交通省都市・地域整備局下水道部 (2002) 生態系にやさしい下水道の促進に向けた手引書

(案)

川瀬基弘・市原俊・寺本匡寛・鶴飼 普 (2018) 名古屋市の淡水産貝類, なごやの生物多様性, 5, 33-45.

中井克樹・松田征也・上西実 (1994) 滋賀県守山市で確認された移入種、ヌノメカワニナ *Melanoides tuberculatus* (Müller)(中腹足目トウガタカワニナ科 Thiaridae)について(予報). 滋賀県立琵琶湖文化館研究紀要, 12, 23-27.

別府温泉藻類RG92の培養における光波長の影響

株式会社SARABio 温泉微生物研究所

岩田 俊祐・加世田 国与士

要 旨

光の波長が別府温泉藻類RG92(*Mucidosphaerium* sp. RG92株)の増殖および糖脂質の合成に与える影響を検証した。RG92は、長波長(550-700nm)で増殖速度を促進し、短波長(400-600nm)で不飽和脂肪酸を有する糖脂質の合成を促進する傾向を示した。

1 はじめに

以前、私たちは別府温泉で発見した藻類RG92の抽出物に抗炎症作用があることを報告した¹⁾。炎症は肌荒れや痛み・痒み、さらには生活習慣病の発症や症状の悪化にも関わっているため、RG92は美容と健康の改善に広く貢献することが期待される。この抗炎症作用の一因として、RG92の糖脂質の関与が示唆された²⁾。糖脂質は光合成装置を構成する膜脂質の主要な成分であり、光はその合成に密接に関わっている。光エネルギーと藻類培養の関係については、光波長が増殖速度に関与すること³⁾、光の強度や照射時間が産生される脂肪酸の種類や量に影響を与えること⁴⁾が報告されている。以前、私たちは従属栄養条件下では飽和脂肪酸を含む糖脂質が、独立栄養条件下では不飽和脂肪酸を含む糖脂質が増加することを見出した⁵⁾。

近年、不飽和脂肪酸の有効性が明らかにされており、それは糖脂質を構成する脂肪酸についても同じであろう。RG92は、独立栄養条件下で糖脂質の脂肪酸不飽和度を向上させたが、藻体の増殖速度は著しく低下した⁵⁾。この問題を解決するため、光の波長が藻の増殖および糖脂質含有量に与える影響について検証を行った。

2 調査方法

2-1. 培養系

培養は0.8%グルコースを添加した混合栄養培養(容量150ml、静置、25°C)で行った。培養容器と白色蛍光灯(32W)の間のカラーフィルム紙を通して光を照射した(12時間/日)。図1にカラーフィルムの波長と透過率の関係を示す。暗所条件の検討は、培養容器をアルミニウムで覆い光を遮って行った。これらの培養液を経時的にサンプリングし、吸光度(660nm)を測定した。

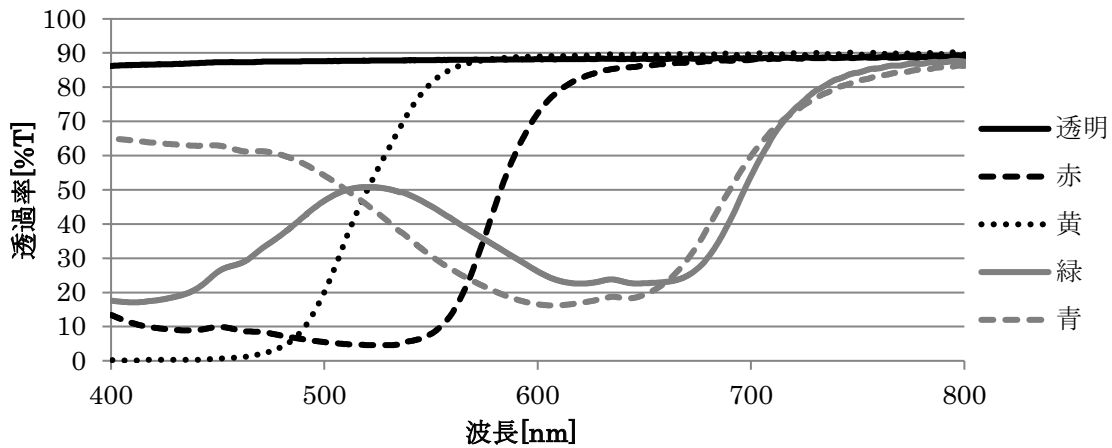


図1 カラーフィルムの透過率

2-2. 糖脂質の測定

回収した藻体からBligh&Dyerの方法⁶⁾により脂質を抽出し、Marcolongoらの方法⁷⁾によって糖脂質を分画した。糖脂質は薄層クロマトグラフィー (TLC)および高速液体クロマトグラフィー(HPLC)で確認した。TLCはクロロホルム/メタノール (3 : 1)を展開液とし、展開後に50%硫酸を噴霧し105°Cで加熱した。その後、ImageJにより輝度解析を行った。HPLCはODSカラムを用いて、アセトニトリル/メタノール/水 (23 : 70 : 7)を溶離液として、オーブン35°C、流速0.5 ml/min、UV 205nmで検出した。標準Monogalactosyl diacylglycerol (MGDG) およびDigalactosyl diacylglycerol (DGDG)を比較対照とした。なお、UV 205nmは不飽和脂肪酸を有する糖脂質を検出する。

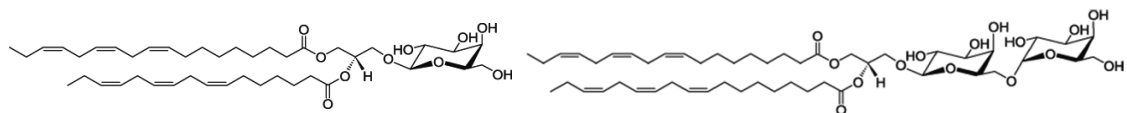


図2 ガラクト糖脂質MGDG (左)とDGDG (右)の構造⁸⁾

3 結果及び考察

3-1. 光波長が藻体の増殖に与える影響

光合成色素であるクロロフィルは青と赤の波長域の光を吸収することが知られており、青色光で珪藻*Chaetoceros* sp.⁹⁾、赤色光で藍藻*Spirulina platensis*や緑藻*Chlorella vulgaris*の増殖を促進することが報告されている^{10,11)}。透明のフィルムを用いた場合にRG92は最も速い増殖速度を示し、次いで黄、赤の順であった。黄と赤のフィルムはクロロフィルの吸収波長である660nm付近の光を透過することから、成長が促進されたと考えられる。反対に、暗所条件ではあまり増殖せず、青と緑色のフィルムを用いた場合にも増殖活性は低かった。RG92の近縁種である*Chlorella*において、青色LEDを照射しても増殖には影響を与えなかったことが報告されている¹²⁾。今回の検証より、温泉藻類RG92は赤および黄色の波長域で増殖の促進を示した。

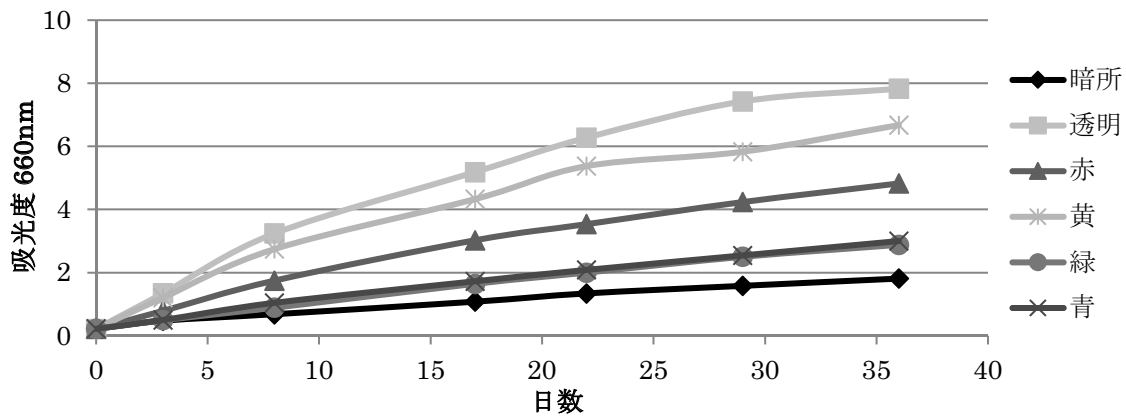


図3 異なる波長によるRG92の増殖

3-2. 光波長が糖脂質含有量に与える影響

図4のTLCの定量解析より、MGDGは赤、黄、緑、青で、DGDGは青と緑のフィルムで透明フィルムを用いた条件および暗所培養条件よりも高い値を示した。その他未知の成分(A、B、C、D、E)についてもフィルムによる含有量の影響が見られた。図5のHPLC解析より、透明フィルムと暗所培養を比較すると、暗所培養条件における総ピーク面積の低下が明らかとなった。MGDGおよびDGDGに相当するピークも縮小しており、糖脂質を構成する脂肪酸の不飽和度が低下していると考えられた。総ピーク面積は透明フィルムよりも赤、黄、緑、青のフィルムの方が高く、特に緑と青のフィルムでは暗所培養条件の約2倍であった。このことから、RG92の糖脂質の脂肪酸不飽和度は短波長域の光によって増加すると考えられる。また、青色LEDを照射した*Chlorella*では、蛍光灯を照射した場合よりも脂質量が50%上昇したことが報告されており¹²⁾、RG92も短波長の光が脂質合成に関与していることが示唆された。一方で、それぞれのピークにおいては透明フィルムの方が多い成分(40, 60 min)もあり、短波長と長波長の組み合わせの効果について検証が必要である。

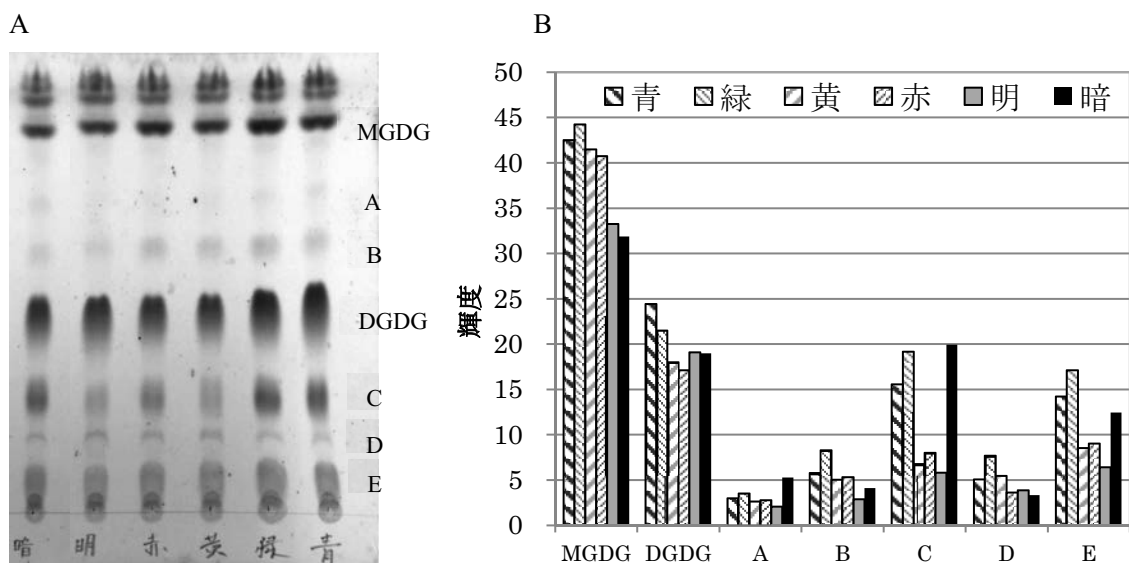


図4 糖脂質のTLC解析 (A: 展開後TLC、B: 輝度解析)

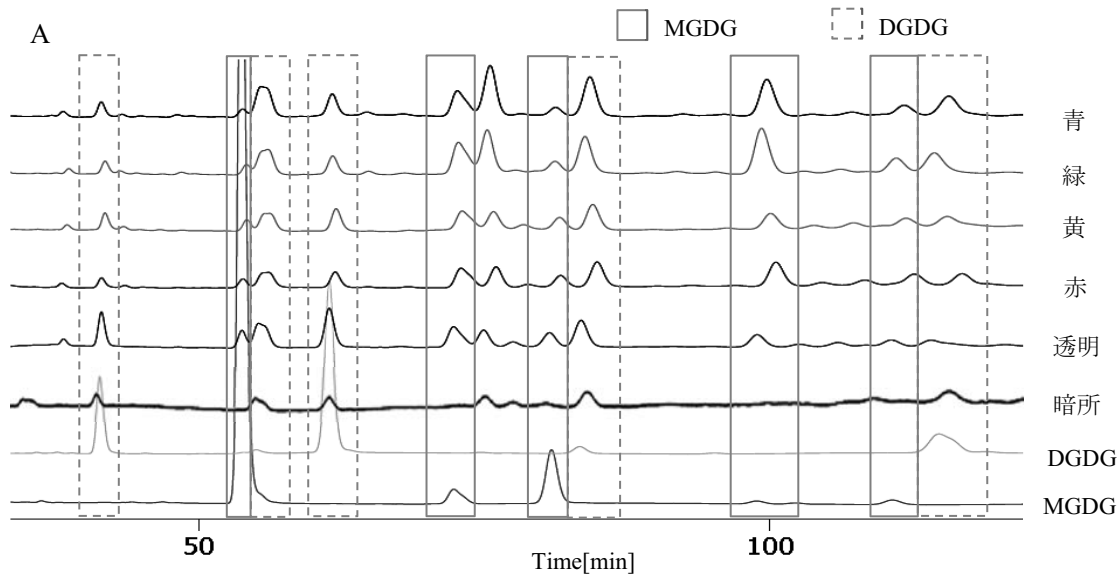


図5 糖脂質のHPLC解析 (A : チャート、B : 総ピーク面積)

4 まとめ

温泉藻類RG92の増殖には赤や黄色の波長、糖脂質の不飽和度には青や緑の波長が関与していることが示された。このことから、RG92の成長段階に合わせて照射する光の波長を変化させることで、藻体の収量を確保しつつ不飽和度が高い糖脂質を産生することが期待できる。

(参考文献)

- 1) 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)
- 2) 宮田光義ら, 別府温泉由来微細藻類*Mucidosphaerium* sp. RG92株の抗炎症作用, *温泉科学*, 68:204-215(2018)
- 3) Oh S. J. *et al.*, Effect of monochromatic light emitting diode on the growth of four microalgae species (*Chlorella vulgaris*, *Nitzschia* sp., *Phaeodactylum tricornutum*, *Skeletonema* sp.). *Korean Soc Mar Environ Safe.* 21(1):1-8(2015)
- 4) Zahra A. K. *et al.*, Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae. *Chlorella vulgaris*, *Aquacult Int.* 20:41-49(2012)
- 5) 岩田俊祐ら, 別府温泉藻類RG92の培養条件の検討, *大分県温泉調査研究会報告*, 70, 77-81(2019)
- 6) Bligh E. G. *et al.*, A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Physiol*, 37:911-917(1959)

- 7) Marcolongo, G. *et al.*, Diacylglycerolipids isolated from a thermophile cyanobacterium from the Euganean hot springs. *Nat Prod Res.* 20(8):766-774(2006)
- 8) Weihua Y. *et al.*, New Membrane Mimetics with Galactolipids: Lipid Properties in Fast-Tumbling Bicelles. *J Phys Chem B.* 117(4):1044-1050(2013)
- 9) Oh S. J. *et al.*, Effects of light quantity and quality on the growth of the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* margalef (dinophyceae). *Algae.* 21(3):311-316(2006)
- 10) Wang C. Y. *et al.*, Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. *Biochem Eng J.* 37:21-25(2007)
- 11) Gokce K. *et al.*, Effect of different wavelengths of light on growth, pigment content and protein amount of *Chlorella vulgaris*. *Fresenius Environ Bull.* 26(12):7974-7980(2017)
- 12) Jessica H. D. *et al.*, Blue light emitting diodes (LEDs) as an energy source in *Chlorella fusca* and *Synechococcus nidulans* cultures. *Bioresour Technol.* 247, 1242-1245(2018)

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 役員は任期は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るとき、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（所属・職名五十音順）

（令和2年5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）	松 木 京 子	常 務 理 事
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	
大分大学教育学部 教授	大 上 和 敏	理 事
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 大分県立病院精神科	塩 月 一 平	
(元)大分大学医学部	青 野 裕 士	
(元)岡山理科大学理学部基礎理学科	北 岡 豪 一	
九州大学 名誉教授	矢 永 尚 士	
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	
京都大学 名誉教授	竹 村 恵 二	
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	
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	
京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 技術専門職員	三 島 壯 智	
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	
東海大学海洋学部 教授	齊 藤 雅 樹	
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	
広島大学大学院先進理工系科学研究科地球惑星システム学専攻 研究員	芳 川 雅 子	
別府大学国際経営学部国際経営学科 教授	中 山 昭 則	
別府大学食物栄養科学部発酵食品学科 講師	加 藤 礼 識	
北海道大学総合博物館 准教授	山 本 順 司	
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	
立正大学地球環境科学部 教授	河 野 忠	
龍谷大学経済学部 准教授	山 田 誠	
(一財)九州環境管理協会 技術部長	川 村 秀 久	
(一財)九州環境管理協会 先進領域課長	芦 川 信 雄	
(一財)九州環境管理協会 品質管理課長	天 日 美 薫	
(一財)九州環境管理協会 分析試験課長	右 田 義 臣	
(一財)九州環境管理協会 環境調査課長	小 野 孝	
(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	
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	
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	

所 属 ・ 職 名	氏 名	備考
(公社)大分県薬剤師会 会長	安 東 哲 也	
(公社)大分県薬剤師会検査センター 施設環境課 課長	甲 斐 美 穂	
社会保険診療報酬支払基金大分支部 審査委員長	安 田 正 之	
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	
日鉄鉱業(株)	酒 井 拓 哉	
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	
GERD地熱技術開発(株) 技術部	長 谷 英 彰	
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	
姫 島 村 長	藤 本 昭 夫	
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	野 田 哲 也	監 事
別府市観光戦略部温泉課 温泉政策係長	河 野 文 彦	
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	土 師 文 明	
大分県衛生環境研究センター 所長	梶 原 浩	理 事
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主幹研究員 (総括)	加 藤 聖 紀	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主任研究員	溝 腰 朗 人	
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微生物担当 研究員	高 野 真 実	
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	水 江 智 子	
大分県衛生環境研究センター水質担当 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	安 藤 佐 和 子	
大分県衛生環境研究センター水質担当 研究員	山 崎 信 之	

(会員数 78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	手 島 淳	
大分県生活環境部自然保護推進室 主事	池 邊 綾 太 郎	
大分県生活環境部自然保護推進室 非常勤職員	西 口 勝 次	

(書記 3名)

大分県温泉調査研究会報告 第71号

令和2年9月 印刷
令和2年9月 発行

発行者 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)
TEL 097-506-3025
FAX 097-506-1749

印刷社 極東印刷紙工株式会社
〒870-0844 大分市大字古国府146番地の3

毎年の「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。