

大分県温泉調査研究会報告

第 73 号

令和 4 年 8 月

目 次

大分県北部地域の温泉に対する地理情報システム (GIS) 解析網 田 和 宏 他 1 人.....	(1)
計算機シミュレーションによる温泉資源の適正湧出量の一般化の試み松 本 光 央 他 1 人.....	(13)
培養細胞系におけるがん細胞株に対する抗ガン剤抗腫瘍効果の温度依存性の検討前 田 豊 樹.....	(33)
別府南部朝見川断層沿いの地下構造	竹 村 恵 二 他 2 人..... (35)
由布院の噴気地球化学調査	大 沢 信 二..... (47)
由布岳・鶴見岳の地球化学的研究 3	柴 田 知 之 他 1 人..... (53)
温泉地の観光地化に於いて大阪商船が果たした役割～別府温泉ならびに紀伊半島を事例として～中 山 昭 則.....	(55)
新型コロナウイルスパンデミックと温泉 ～新しい生活様式は温泉入浴行動にどのような影響を与えたのか?～加 藤 礼 識 他 5 人.....	(69)
エンジョイ 別府温泉とオーガニック&ヘルシーな地元食材を体験しようマヒチ・ファエゼ.....	(79)
生体防御機能における温泉微生物の効果	宮 田 光 義..... (83)

序

昭和23（1948）年7月10日、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（以下、本会）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調査研究を実施し、得られた成果を機関誌「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、沸騰泉の沸騰停止、掘削深度の増大などです。これらの事実に対して、温泉資源保護の観点から、行政面での対策が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指定です。本年（令和4年）4月には、別府市において、昭和43（1978）年以来44年振りに2地域が追加指定されました。

他方、温泉に関する諸研究分野の調査研究も行われてきました。それらの成果も合わせて、「大分県温泉調査研究会報告」に掲載された報文数は、昭和25（1950）年発行の第1号から令和3（2021）年の第72号までの72年間に、631編を数えます。

令和3（2021）年度の調査研究事業も、これまでのあゆみに沿って計画され、2020年初頭頃から続く新型コロナウイルス禍中にありながら、調査研究は遂行されて、ここに理工学、医学、人文社会科学に関する10編の報文を収録した「大分県温泉調査研究会報告 第73号」を発行する運びとなりました。

厳しい条件のもとで調査研究を遂行された会員諸氏、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、併せて、温泉調査研究のさらなる進展と本会の持続的発展を祈念し、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4（2022）年8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に対する 地理情報システム（GIS）解析

秋田大学理工学部システムデザイン工学科

網田和宏

大分大学教育学部

大上和敏

要 旨

大分県の北部地域に分布する温泉を対象に、近年実施された現況調査のデータを活用した GIS 解析を実施した。34 箇所の温泉データに位置情報を与えることで、泉温が 40°C を超す温泉、pH が 8 より高い温泉、井戸の下端が海拔下 300m より浅い温泉については、その多くが研究対象地域の南西～南側に分布していることが明らかとなった。また、主要溶存イオンの濃度分布については、大まかには南西～南側に低濃度、北東側に高濃度の温泉が分布する傾向が認められた。研究対象地域をボロノイ分割し、情報のフィルター処理を行って水質分布図を作成した結果、水質タイプの分布領域と泉温との関係性について視覚的に捉えることができた。

1. はじめに

地理情報システム（Geographic Information System : GIS）は、「地理的位置を手がかりに、位置に関する情報をもったデータ（空間データ）を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術」である（国土地理院 HP）。コンピューターの画像処理能力やソフトウェアの性能の向上に加え、オープンデータの整備も進んでおり、年々、利用環境の充実がはかられている分野といえる。そのような状況をうけて、近年では土木分野や農林分野のみならず、多岐に渡る分野でその活用の幅を広げている。著者らも温泉分野において将来的に GIS を用いた解析や分析が普及していくであろうことを想定し、温泉分析書に記載された情報を GIS 解析する際のジオコーディングに関する検討を行ったり（網田ほか, 2017）、あるいは、温泉分析書のデータを利用した GIS 解析を行うなどし、その結果について報告してきた（網田ほか, 2018）。

そこで本研究では、今後の動向を見据えて、既存の温泉データが存在するにもかかわらず、未だに GIS 解析が行われたことのない地域に対する予察的な研究として、大分県北部地域を対象としたデータ解析を行ったので報告する。

2. 研究の概要

2.1 使用データについて

研究対象地域は、大分県北部地域の豊後高田市、国東市、宇佐市および中津市とした。これらの地域については大上・西田（2017）、大上・豊田（2018）、大上・中島（2019）によって温泉の現況調査が行われており、近況を反映したデータの得られている地域である（表 1）。本研究では、これらの報告で公表されている計 34 ヶ所の温泉の pH、水温、井戸深度、および主要溶存成分のデータ（Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、

Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻) を用いて GIS 解析を行った。なお、解析にはオープンソース・ソフトウェアである QGIS (ver. 3.22.4) を使用した。

表 1 解析に使用したデータの調査地域および調査地点数

著者	発表年 (調査年)	調査地域	調査地点数
大上・西田	2016(2017)	中津市	15
大上・豊田	2017(2018)	宇佐市	11
大上・中島	2018(2019)	豊後高田市	6
		国東市	2

図 1-1 に調査対象地域内における温泉の分布と調査地点の識別ナンバーを示し、図 1-2 では地質図上における温泉の位置の関係を示した。図 1-1 でベースとした地図は、国土地理院によって公開されている基盤地図情報の数値標高モデル (5m メッシュ) を基に作成した陰影起伏図を使用した。陰影起伏図の南西端の一角や国東半島の西部に空白の領域が生じているが、これは未だに数値データが準備されておらず計算ができなかった領域となっている。また、各温泉に対応させた識別ナンバー (BK-1, US-3 など) については、大上ら (2017, 2018, 2019) が報告時に使用した名称をそのまま使用した。図 1-2 の地質図には、産業技術総合研究所の地質調査総合センターによって公開されている 20 万分の 1 地質図幅「中津」のラスターデータを使用した。

2.2 温泉分布と地質の関係

図 1-2 より本地域の温泉の分布と地質との対応関係について概観する。本地域は、中津市山国川流域から伊予灘にかけて東西方向に分布する宇佐火山岩類 (後期中新世-後期鮮新世) や、国東半島全域を広く覆う両子火山の溶岩および火砕堆積物 (前期更新世)、玖珠町側から中津市の南端域に分布する耶馬溪火砕流堆積物 (前期更新世) など、新第三紀~第四紀の火山岩類が広く分布しているが、温泉の湧出地点もこれらの火山岩類の分布と対応しているものが多い。例えば、国東半島では、両子山山頂付近の KS-1, KS-2, BK-3, BK-6 が下部火砕堆積物上に位置しており、その他の 3 源泉 (BK-1, BK-2, BK-5) は上部火砕堆積物の分布範囲に位置していた。唯一、BK-4 のみ後期更新世の中位段丘堆積物上に位置したが、この温泉井も両子火山上部火砕堆積物の分布範囲の縁辺域 (山裾部) に位置していた。なお、大上ら (2019) の調査で豊後高田市および国東市では 8 源泉が閉止孔となっていることが報告されているが、これら 8 源泉の閉止孔の内 7 源泉については、上部火砕堆積物の山裾側の縁辺域に湧出していた温泉であった。

宇佐市の温泉の分布を地質との関係からみた場合には、中津平野の段丘堆積物上に位置する US-1~US-3、前期鮮新世の活動による中期宇佐火山岩類の地質境界付近に分布する US-4~US-7、研究対象地域の南境界部付近に分布する US-8~US-11 の 3 つ大別することができる。US-8~US-11 の南側には新期宇佐火山岩類と噴出時期が近いと考えられている人見岳火山岩類の分布がみられる上に、中期宇佐火山岩類と人見火山岩類の西側の境界部は新期宇佐火山岩類と接していることを考慮すれば、US-4 以降の温泉の位置については、全て火山岩類の地質境界付近に井戸が分布しているとみることができる。

中津市の温泉は、新期宇佐火山岩類とその南側で宇佐火山岩類を覆っている耶馬溪火砕流堆積物の分布範囲に分布していた。例外的に、研究対象とした温泉群の中で最も西側に位置している NK-4 のみが、

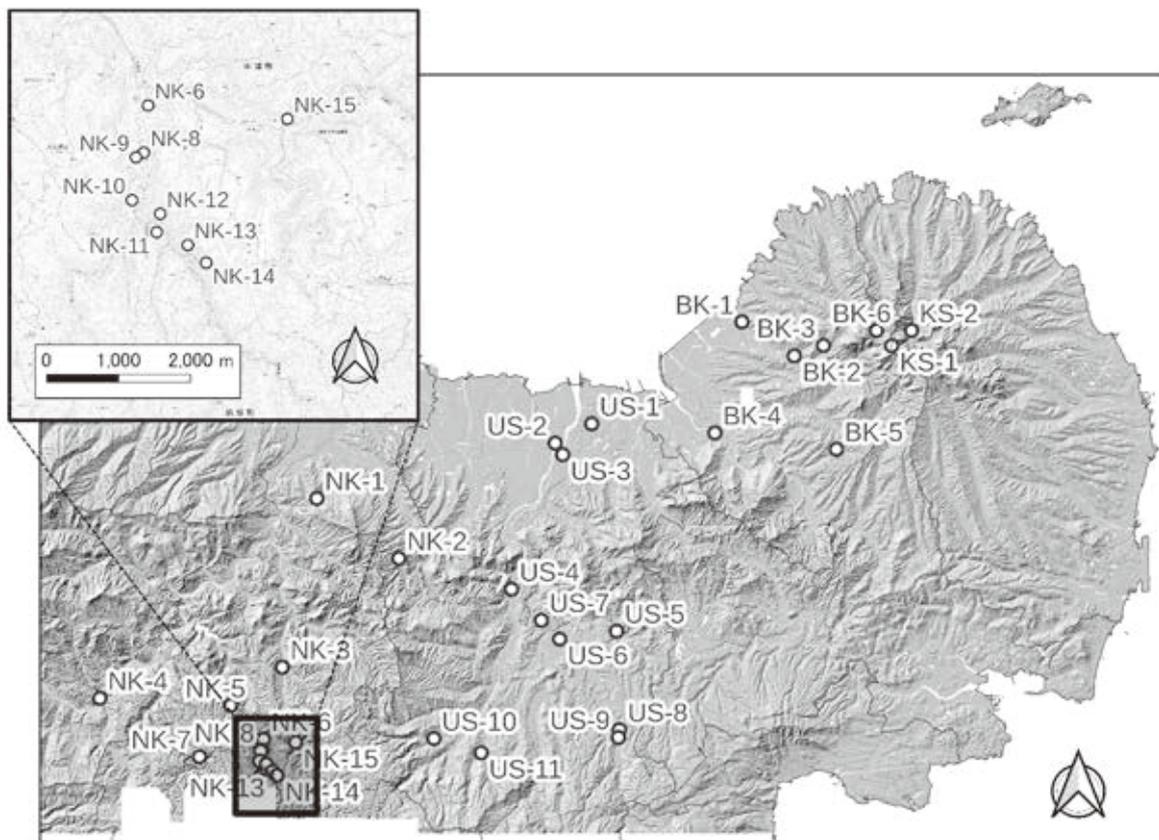


図 1-1 調査地点の位置図

(大上・西田, 2017, 大上・豊田, 2018, 大上・中島, 2019 を基に作図)

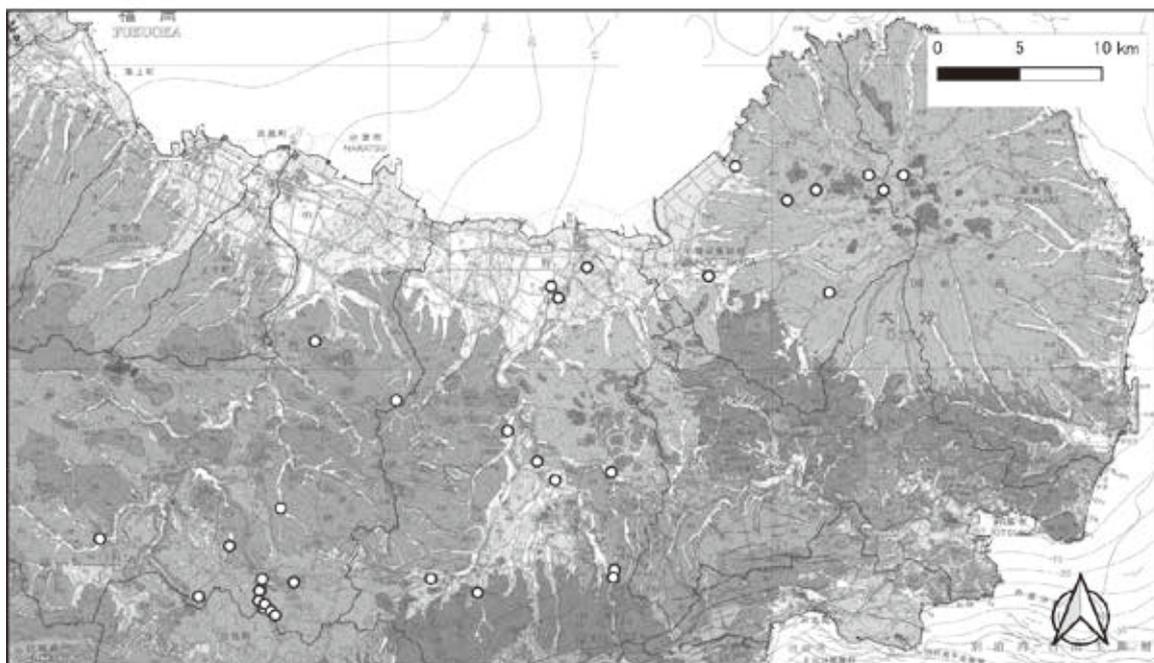


図 1-2 調査地点の位置と地質の関係

(地質調査総合センター, 20 万分の 1 地質図「中津」に加筆して作成)

英彦山火山岩類（後期中新世－前期鮮新世）の分布範囲に位置する温泉となった。

3. 結果と考察

3.1 pH, 泉温, 井戸深度の等値線図を用いた分析

解析の第一段階として、各種温泉データの平面分布図を作成した。平面分布図の作成に当たっては、調査地点の温泉データを基にするが、データのない領域については逆距離加重法によってデータの空間補間を行い、ラスターデータを作成した。その後、作成したラスターデータに対して一定間隔で同値のセルを抽出することで等値線（コンター）を描画させた。本項では、基礎的な情報として水温、pH、井戸の深度についてコンター図を作成したので、各コンター図にみられた特徴について述べる。

図2に泉温のコンター図を示した。図中、泉温が高い場所ほど色が暗く表示され、逆に泉温が低くなるほど明るい色で表示されるように配色した。今回、解析対象とした県北地域では泉温は19.2℃～60.9℃の範囲の値をとったが、図より、国東半島の西側と宇佐市の中央部、中津市の北部側に泉温が35℃を下回る温泉が分布していることが分かる。一方、50℃を超えるような本地域内における「高温」の温泉については、国東半島の両子山山頂付近と宇佐市の南部に位置することが分かった。また、中津市と宇佐市の南側の広い範囲に泉温40℃を超える温泉が分布していることもみてとれた。

図3にpHのコンター図を示した。泉温同様に値の高い場所は暗い色、値が低い場所は明るい色で表示されるように配色してある。県北地域のpHは5.9～9.1の範囲の値をとったが、pH7.5を超える温泉の多くが、調査対象地域の南側に位置しており、特にpH8.0以上の値をとる温泉は北側には存在していないことがわかる。

図4には井戸の深度のコンター図上に、総塩分濃度（Total Dissolved Solids : TDS）の棒グラフを重ねた図を示した。ただし、井戸の深度については、調査時に「不明」であった井戸が9箇所（BK-4, KS-2, US-3, US-8, NK-2, NK-8, NK-10, NK-11, NK-13）あり、それらの井戸についてはコンター図（ラスターデータ）に反映されていない。また、図示した井戸の深度については、数値地図上において温泉の位置から地点標高を割り出しておき、それらの標高データと井戸の掘削深度との差をとった値を使用した。したがって、コンター図上に示された数字は、井戸の下端が標高何m地点に到達しているのかを示す数値となっている（海拔を0mとし、海拔下の標高についてはマイナスで表記）。また、TDSの棒グラフで、BK-1とUS-6の2地点については、値が10,000 mg/Lを超えており（それ以外の井戸によるTDSの平均値は1,017 mg/L）、同じ図上で表記することが難しかったため、図4では表記対象から除外している。

井戸の深度に関するコンターより、本地域の南西部の温泉については、その多くが海拔下300m以浅の井戸より得られたものとなっており比較的、地下浅所より得られる温泉であることがわかる。一方、その他の区域については、中津市の中央部と国東半島の両子山山頂付近に例外的に深い深度より得られている温泉（NK-1 ; -1387 m, BK-6 ; -1045m）があるものの、多くの温泉は概ね海拔下500～600mより得られていることがみてとれた。また、TDSについては井戸深度との間で相関が認められた訳ではなかったが、深度の浅い南西部の温泉についてTDSが低いものが多く、それに対して中央部から北東部にかけてはTDSの高い温泉が分布するという大まかな傾向があることが分かった。

3.2 主要溶存イオン濃度の等値線図を用いた分析

3.1項と同様の方法で、陽イオンのコンター図（図5-1～図5-4）、および陰イオンのコンター図（図6-1～図6-3）を作成した。図5および図6においてラスター平面の色の配色については、濃度が高い領域を暗色、濃度の低い領域を明色で表示し、コンター線は黒で描画したが、図5-1のNa⁺と図6-1のCl⁻のみ

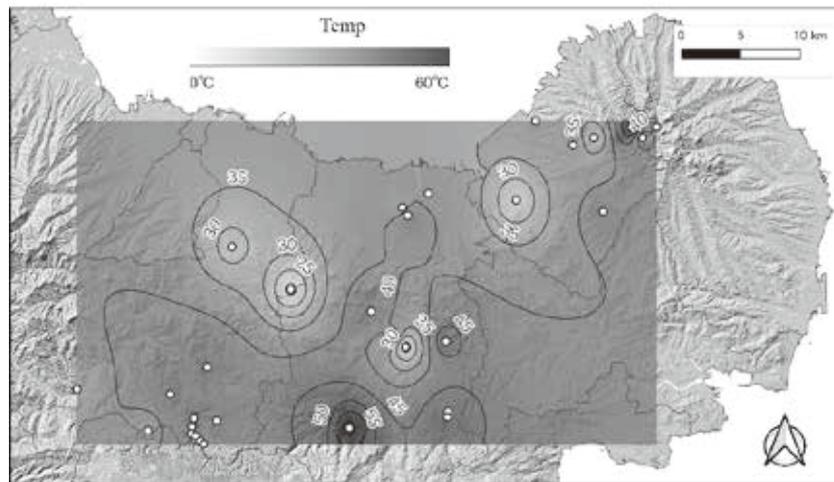


図 2 泉温の等値線図

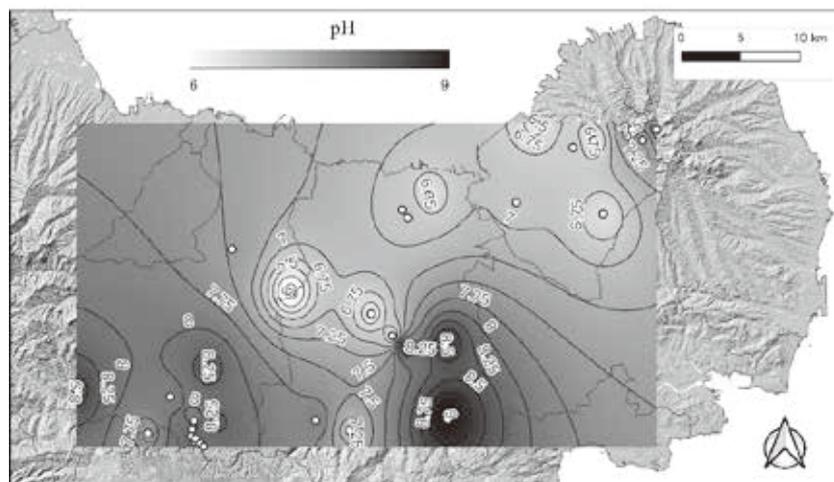


図 3 pH の等値線図

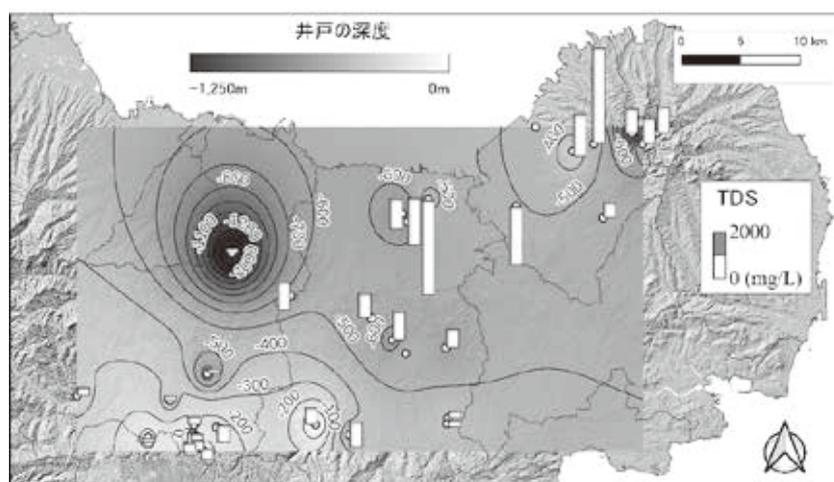


図 4 井戸の深度の等値線図と総塩分濃度 (TDS) との関係

視認性を考慮してコンター線を白色で表示した。

Na⁺のコンター図（図 5-1）をみると、TDS が 10,000 mg/L を超えていた BK-1、US-6 が共に Na⁺の高い温泉（BK-1 ; 9,817 mg/L, US-6 ; 3,900 mg/L）であることから、これらの点の付近でコンター線が高密度となってしまう、周辺領域が白色で塗りつぶされてしまっている。また、これらの点の周辺に位置する温泉についても、同心円状のコンター線が描画されてしまっており複雑なコンター形状が描画される結果となった。このように、空間分布に不連続性をもたらすような極端な値を示す点が距離の近い関係で位置しあっている場合には、コンター線の密度のみならず、形状にも影響を与えることになるため、図をみる際に注意が必要となる。

K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺では、US-6 の濃度が他の地点と比較してさほど高くなかったことから、比較的滑らかなコンター線が描かれたが、BK-1 については全てのイオンが高濃度であったことから、北東側にコンター線の密度の高い領域が形成された。ただし、これら濃度の高い温泉の影響を考慮した場合でも、ラスト平面の明暗関係から読み取れるように、研究対象領域の中央部より北東側に相対的に濃度の高い温泉の分布がみられ、一方で西側に位置する中津市の温泉については、どの等値線図をみてもイオン濃度の低い温泉が分布していることが示された。以上の事から、陽イオンのコンター図に関しては、全体的な傾向として濃度の高い北東側に対して、濃度の低い南西側という、TDS の関係と同様の特徴を有していることが分かった。

陰イオンのコンター図についても（1）BK-1 の濃度が高い、（2）南西側（中津市）の温泉については濃度が低い、といった、陽イオンと共通する傾向が認められた一方で、HCO₃⁻や SO₄²⁻では異なる特徴も有していることが示された。例えば、Cl⁻については、BK-1 および US-6 が高い値を示したことから、Na⁺と似たようなコンター図が得られており（図 6-1）、BK-1 および US-6 が高塩分の Na-Cl 型温泉であることがコンター図のみからも判別することができた（これらの温泉が高塩分の Na-Cl 型であることは大上らによって報告済み）。

これに対して HCO₃⁻では BK-1（1,640 mg/L）や US-6（451 mg/L）ではなく、BK-3（2,870 mg/L）や BK-4（1,790 mg/L）、あるいは US-1（2,820 mg/L）や US-3（1,400 mg/L）の方が高い濃度を示したことから、陽イオンや Cl⁻とは異なる印象のコンター図に仕上がった。また、SO₄²⁻については 150 mg/L 以上の濃度を示した温泉が両子山山頂付近に位置する温泉に限られており、他のイオンと比較しても北東側の一角にのみ高濃度の温泉が分布していることが示された。

以上、主要溶存イオンの等値線図を作成し、それらの特徴について簡単に述べてきた。すでに述べた様に、作図の対象とする範囲内に、周囲と連続性を持たない極端に濃度の高い温泉（データ）が含まれていた場合には、コンター図中の一定の範囲に影響が及ぶため注意が必要である。今回の分析でいえば、BK-1 と US-6 がそれにあたるが、これら 2 つの温泉は高塩分の Na-Cl 型である事が分かっている。さらに、高塩分ではないものの Na-Cl 型は県北地域の温泉がもつ代表的な水質タイプの一つであることから、Na/Cl 比の等値線図を作成した（図 7）。この図では、それぞれの温泉の Na/Cl 比を海水の Na/Cl 比（0.553）で除して標準化した値（これを Na/Cl 比_{（海水比）}と表記する）を用いている。したがって、図 7 において Na/Cl 比_{（海水比）}が 1.0 になる場合は、温泉の Na/Cl 比が海水の値と同じであることを意味している。

今回、研究対象とした 34 地点の温泉の内、Na/Cl 比_{（海水比）}が 1.0 以下となったのは、BK-1（0.80）のみであり、残りの 33 地点については全て 1.0 を上回った（最小値 ; 1.05, 最大値 ; 30.0, 平均値 ; 9.1）。図 7 より、Na/Cl 比_{（海水比）}が 4 以下の低い領域が BK-1 と US-6 を結ぶ線上にあたる北東-南西方向に帯状に分布している事がわかる。US-6 も Na/Cl 比_{（海水比）}は 1.24 と 1.0 に近い値を示しており、BK-1 と共に

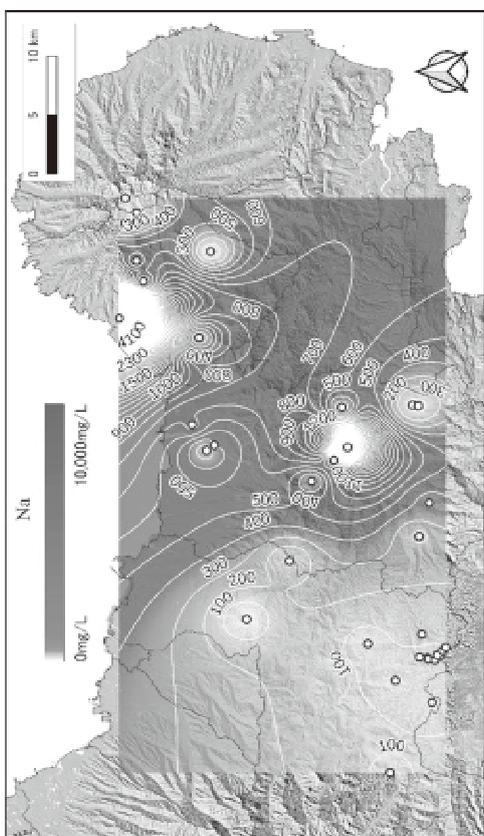


図 5-1 Na⁺の等値線図

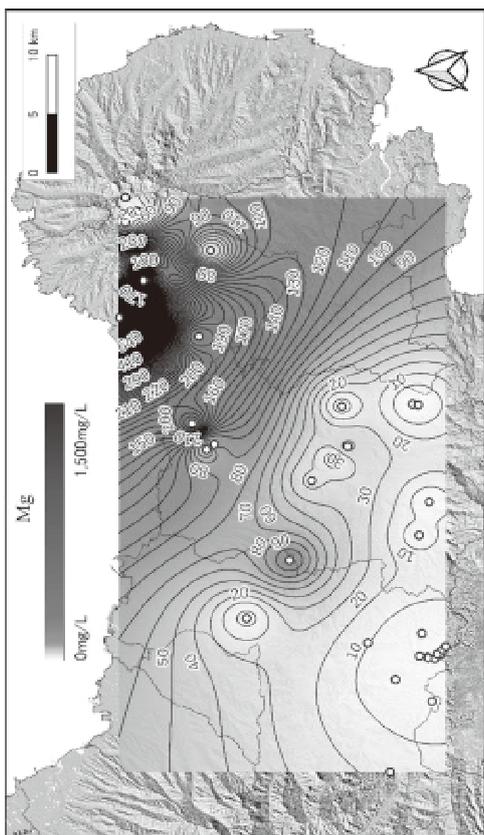


図 5-3 Mg²⁺の等値線図

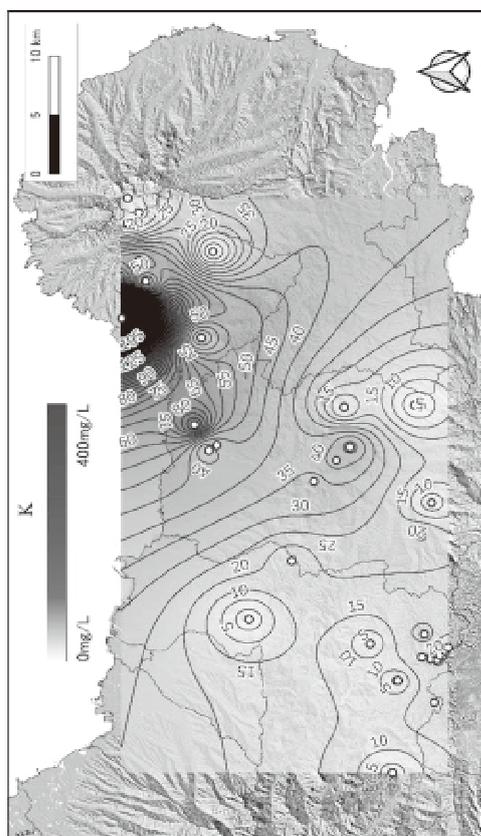


図 5-2 K⁺の等値線図

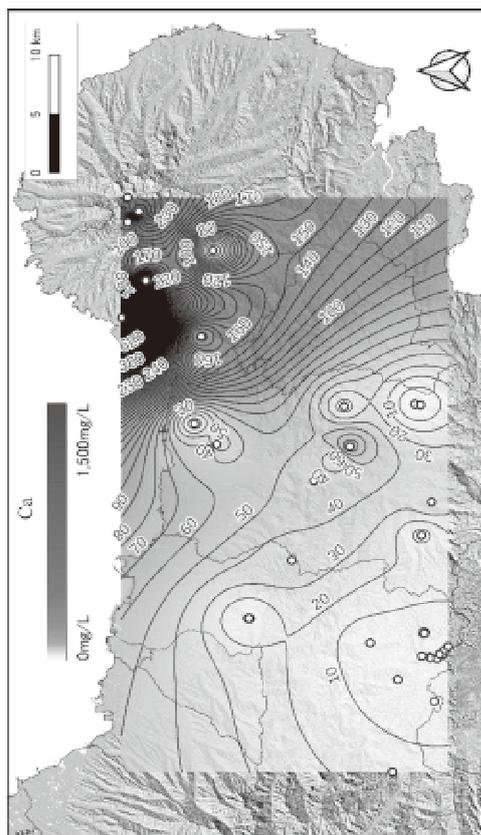


図 5-4 Ca²⁺の等値線図

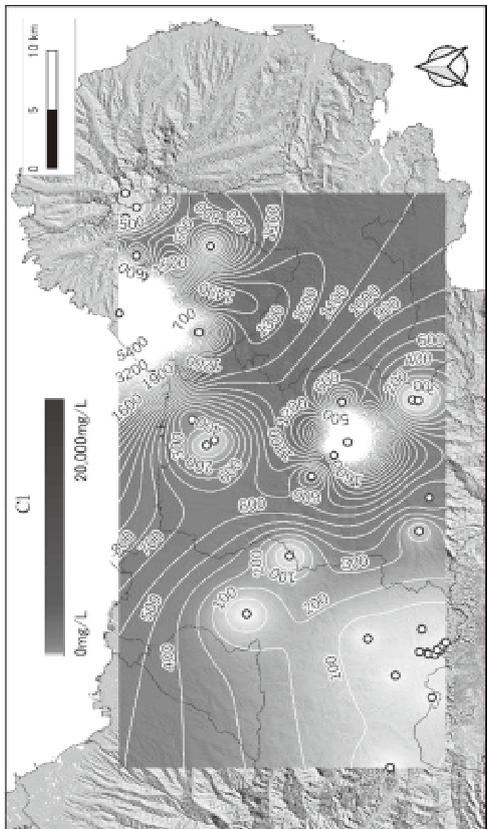


図 6-1 Cl⁻の等値線図

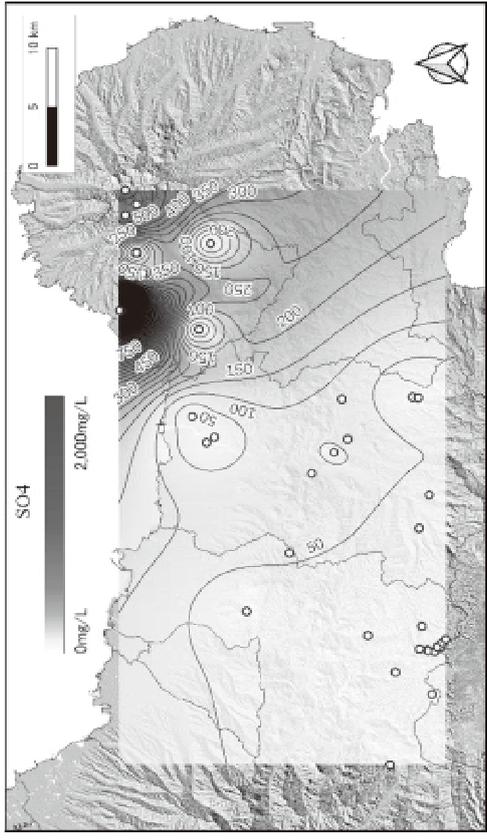


図 6-3 SO₄²⁻の等値線図

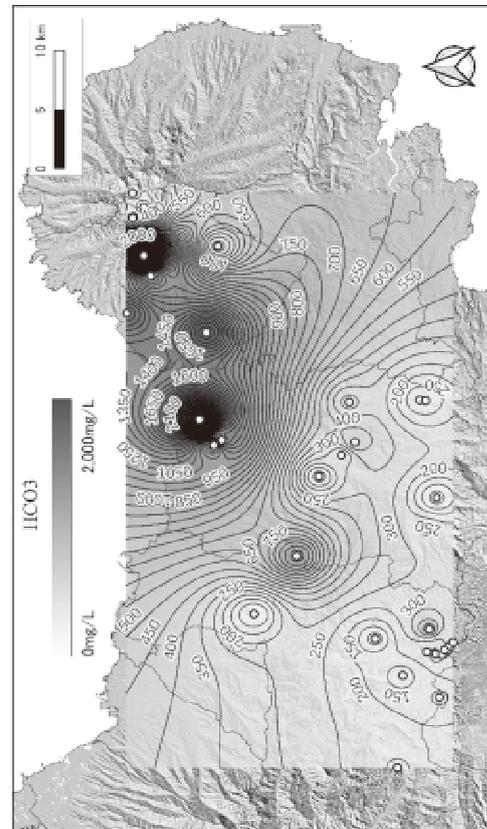


図 6-2 HCO₃⁻の等値線図

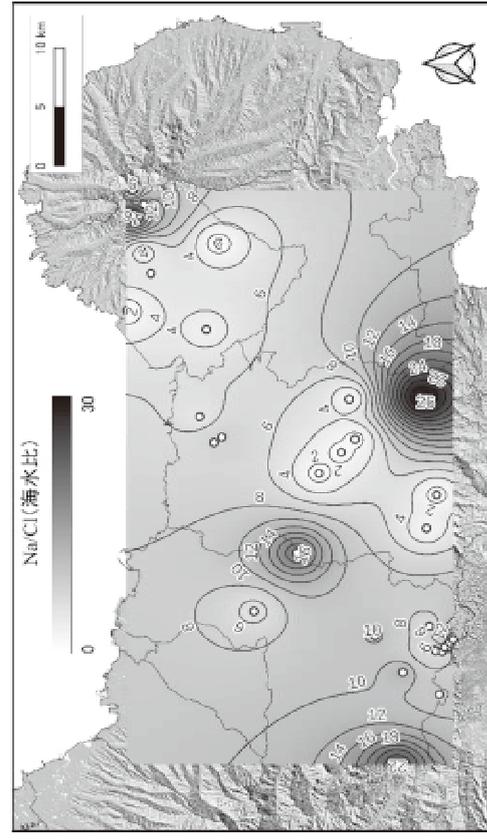


図 7 Na/Cl 比 (海水で標準化) の等値線図

海水比と同等の Na/Cl 比となっていた。一方で SO_4^{2-} のコンター図 (図 6-3) でも触れたように、 SO_4^{2-} 濃度については、BK-1 が 2,930 mg/L と高濃度であったのに対して、US-6 は 96.1 mg/L と周囲の温泉と同程度の値しか示していなかった。そこで BK-1 について、その他のイオンの濃度や Cl- との比を求めてみたところ、いずれも海水の濃度や比に近いものであったことから、BK-1 については現海水の影響を色濃く受けた温泉である可能性が示唆された。一方、US-6 については BK-1 とは異なる素性を考える必要のある温泉であることが示された。

3.3 ボロノイ分割と水質タイプおよび泉温データの重ね合わせ解析

3.1 項、3.2 項では、泉温や pH、各イオン種などに対して等値線図を作成し、その特徴や傾向について分析を行った。しかし、これらは 1 つの情報を位置情報と結びつけただけのものである。温泉の諸情報を位置情報と関連付けただけでもデータの持つ様々な特徴や傾向を分析することは可能であるが、複数の情報 (レイヤ) の重ね合わせを行う事で、それらの情報間に内包されている関係性を見出し、抽出できる点も GIS 解析の持つ特色の一つである。そこで最後に、温泉データに対して情報のフィルター処理を行うことで特定の水質タイプを抽出し、これと泉温分布とを重ね合わせる解析を行った。

最初に QGIS の機能を用いて、温泉の位置情報を基にした解析対象地域内のボロノイ分割を行った (図 8 中央の図)。ここで、ボロノイ分割とは、平面上に設定された「母点 (本研究の場合は温泉の位置)」と呼ばれる複数の座標に対して、ボロノイ領域を算出・分割することをいう。また、ボロノイ領域とは、ある母点までの距離が最短となる点の集合を一つの領域で表したときの各領域の事であり、全ての母点に対してボロノイ分割を行った図の事をボロノイ図と呼ぶ。そのため、2 次元平面におけるボロノイ分割では、各ボロノイ領域の境界線は母点間を結ぶ線分の垂直 2 等分線となる。

図 8 に示したように、温泉の地点ごとにボロノイ領域が算出されているため、これらボロノイ領域に温泉データを関連付けた上で、フィルター処理を行った。今回はフィルターとして 4 種類の条件を与えた。その条件が図 8 中で点線の四角で囲われた内容である。これらの条件については、大上ほか

(2017, 2018, 2019) の調査結果より、本地域の温泉に認められる水質タイプが Na, Mg- HCO_3 型, Na- HCO_3 型, Na-Cl 型, Ca- SO_4 型の 4 種類であることから設定したものである。選定条件には、各イオンの当量濃度に対して、陽イオン 4 成分 (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) の当量濃度比および陰イオン 3 成分 (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) の当量濃度比を用いた。図 8 の左上側、Na, Mg- HCO_3 型のフィルター条件を例に説明すると、 Na^+ と Mg^{2+} の陽イオン当量濃度比がどちらも 30 % を超えている温泉で、かつ Cl^- の陰イオン当量濃度比が 50 % を超えた温泉のボロノイ領域のみが表記されているのが図 8 の左上の Na, Mg- HCO_3 型の図ということになる。最後に、フィルター処理後のボロノイ図にコンター図の重ね合わせ処理を行った。今回は、水質タイプとは独立性の高い情報であると判断したことから、泉温のコンターを重ねることにした。

4 つの水質タイプの分布をみると、Na, Mg- HCO_3 型の温泉については、研究対象地域の北側にしか分布しておらず、また泉温が 35°C 以下の温泉でしかみられていない水質タイプであることが明らかになった。次に Na- HCO_3 型の温泉については、研究対象地域の南側の泉温が 40°C 以上となる領域に広く分布が認められ、さらに北側の一部地域にも存在している事が示された。Na-Cl 型は主に宇佐市の中央部～南側のやや泉温の高い領域に分布がみられ、これらの温泉と、1 点だけ離れて位置する BK-1 とで構成されているのが分かった。Ca- SO_4 型については、 SO_4^{2-} の等値線図でも触れたように北東端の一角に高濃度領域があることから、この領域にのみ分布することが示された。以上の様に、位置情報に加えて複数の情報を重ね合わせた解析図を作成することで、従来、議論されていなかった関係性について議論や考

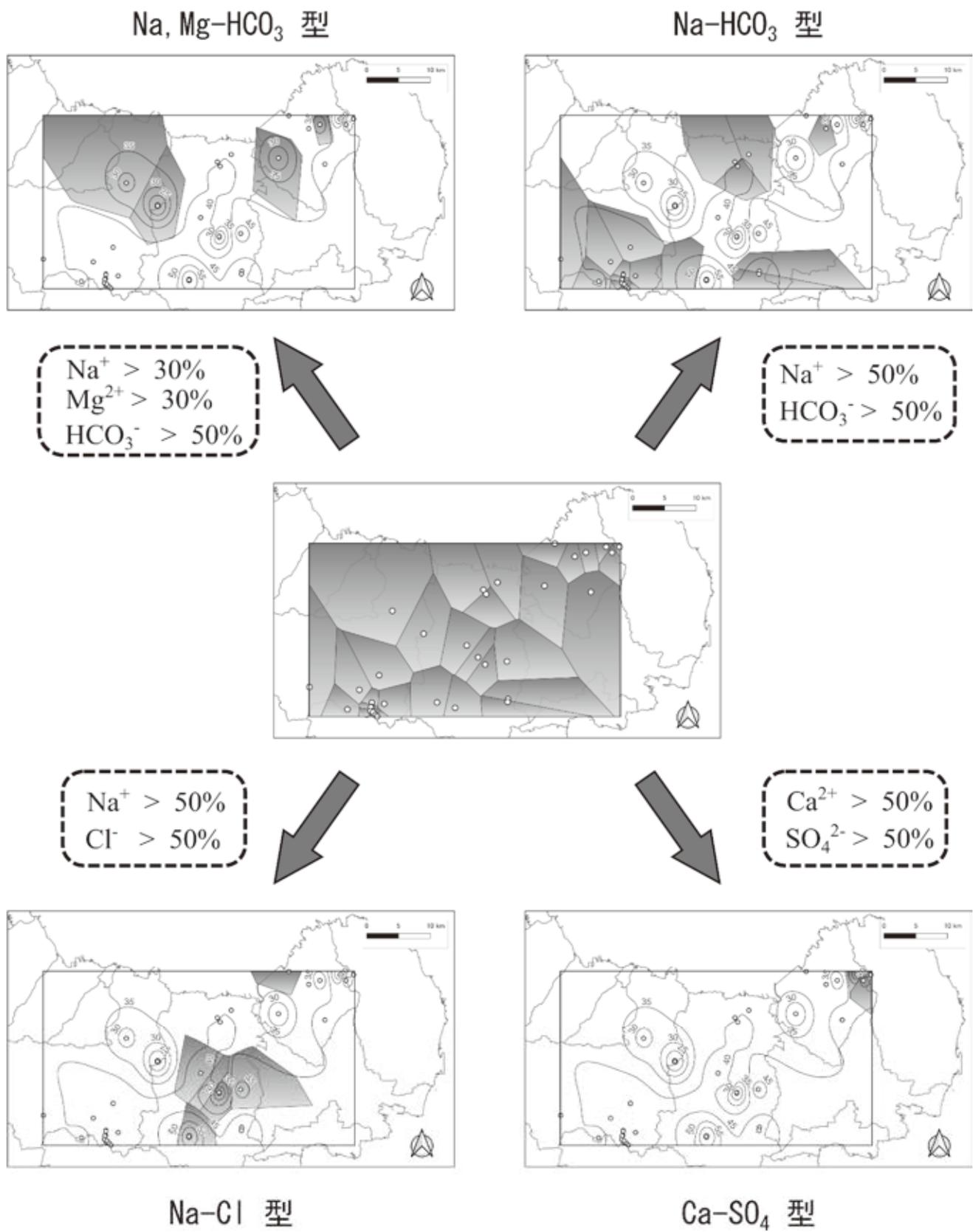


図8 ポロノイ図を用いた水質タイプと泉温データの重ね合わせ解析図

察を行う事が容易となる事が示されたと考える。

従来、水質タイプの地理的な分布を把握しようと試みる場合は、例えば、ステップダイアグラムを作成し、これらを地形図上に描画させて考察する、といったやり方が多く用いられてきた。その様な手法でも本項で行った解析と同様のことを行う事は可能である。ただ GIS 解析では、フィルターの条件を様々に変えることで、即座に異なる条件についての検討が可能となる。また今回は水質タイプと比較する空間分布図として泉温のコンター図を選択したが、これを pH にした場合、井戸の深度にした場合などについても、簡単に比較することが可能である。以上のことから、今後は GIS 解析を前提とした温泉データの整備や、あるいは既往研究で得られたデータに対して、GIS による一次解析を行い、地域ごとに温泉データの空間分布図（コンター図）を作成しておくこと等を検討していくことも重要ではないかと考える。

4. まとめ

本研究では、大分県北部地域の中津市、宇佐市、豊後高田市、国東市に分布する温泉に対して、近年実施された現況調査のデータを用いた GIS 解析を実施した。その結果、以下の点について確認することができた。(1) 34 箇所の温泉データに位置情報を与えることで、本地域の温泉の多くが、両子火山火砕堆積物および宇佐火山岩類の分布範囲に位置する温泉であることが分かった。(2) 泉温が 40°C を超す温泉、pH が 8 より高い温泉、井戸の下端が海拔下 300m より浅い温泉については、主に南西～南側に分布がみられることが明らかとなった。(3) 主要溶存イオンの濃度分布の関係より、相対的に低濃度を示す温泉が多く分布する南西～南側に対して、北東側に高濃度の温泉が分布する傾向が認められた。また、この傾向は陽イオンの濃度分布で顕著であった。(4) 研究対象地域をボロノイ分割し、情報のフィルター処理を行って水質タイプの分布と泉温との関係を調べた結果、水質タイプの分布範囲を視覚的に捉えることができた。

参考文献

- 網田和宏，松田健斗，大沢信二．（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，第 68 号，p.23-30.
- 網田和宏，酒井拓哉，大沢信二（2018）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～，大分県温泉調査研究会報告，第 69 号，p.71-78.
- 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，第 68 号，p.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，第 69 号，p.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，第 70 号，p.3-9.
- 石塚吉浩，尾崎正紀，星住英夫，松浦浩久，宮崎一博，名和一成，実松健造，駒澤正夫（2009）20 万分の 1 地質図幅「中津」，NI-52-4，独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター。

参考 URL

国土地理院 HP，GIS とは…， <https://www.gsi.go.jp/GIS/whatisgis.html>，（2022 年 2 月閲覧）

国土地理院，基盤地図情報ダウンロードサービス，<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>，（2022年2月利用）

国土地理院，国土数値情報ダウンロード，<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>，（2022年2月利用）

産総研，地質調査総合センター，地質図カタログ，<https://www.gsj.jp/Map/index.html>，（2022年2月利用）

計算機シミュレーションによる 温泉資源の適正湧出量の一般化の試み

九州大学 大学院 工学研究院 地球資源システム工学部門
松本光央・糸井龍一

要 旨

別府温泉での現地調査に基づいて導かれた、従来の温泉資源保護の指針の背景理論をレビューし、幅広い地域の温泉帯水層に同理論を展開するための論点を整理することを試みた。その結果、条件によっては従来の指針が採用する単位面積あたりの湧出量の上限を決定できない場合があり得ることが明らかになった。そこで、同一温泉帯水層からの総湧出量の管理による温泉資源保護の可能性を、計算機シミュレーションにより検討した。更に、許容可能な総湧出量の上限を算出するための簡便な計算式を導出した。

1. はじめに

温泉は我々日本人にとって、観光や産業に供する資源としての位置付けに留まらず、我々の文化と不可分の存在であり、末長く後世に引き継ぐべき国民共有の財産である。他方、世界的な脱炭素に向けた動きのもと 2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では、地熱発電施設数の 2030 年までの倍増を目指すなど、温泉のエネルギー資源としての需要は今後も拡大が見込まれる。脱炭素による気候変動問題への対応も次世代への先送りが許されない課題であることから、温泉資源の保護と利用の高い次元での両立が求められている。

温泉資源保護の重要な指針を科学的に導いた例として、山下（1961, 1967）は別府温泉における揚水試験を中心とする現地調査と、温泉帯水層の流動モデルによる理論的検討により、100 m 平方あたりの湧出量を 120 l min^{-1} 以内に制限する必要があると指摘した。この成果は、今なお重要な指針となっている。ただし、山下（1961, 1967）が現地調査をもとに評価した滲出係数と透水量係数の比を含む種々の温泉帯水層の条件は、地域によって異なると考えられる。そのため温泉資源をより効果的に保護するためには、それらの条件の地域性に応じたきめ細かな対応が必要と考えられる。

本研究ではまず、山下（1961, 1967）が用いた温泉帯水層の流動モデルの理論をレビュー

一し、幅広い地域の温泉帯水層に同理論を展開するための論点の整理を試みた。当初は、前述の別府温泉における「100 m 平方あたり 120 l min⁻¹以内」に相当する単位面積あたりの湧出量の上限を、地域毎に決定するために必要なパラメータを整理することを念頭に置いていた。しかしながら検討の過程で、条件によっては従来の考え方に基づく単位面積あたりの湧出量の上限を決定できない場合があることが明らかになった。そこで本研究では、その場合にも効果的に温泉資源を保護するための考え方の1つの可能性として、同一温泉帯水層からの総湧出量の管理による温泉資源保護の方法の検討に重点を置いた。

本報告ではまず前述のレビューを示した上で、総湧出量の制限方法を具体化するための問題設定を行い、それを計算機シミュレーションで再現した結果を示す。更に実用性を高めるため、設定問題の基礎となる考え方とシミュレーション結果を踏まえて導出した、許容可能な総湧出量の上限を算出するための簡便な計算式とその計算例を示す。

2. 先行研究のモデルのレビュー

本章では、山下 (1961, 1967) が用いた温泉帯水層の流動モデルの理論を再現・レビューすることで、幅広い地域の温泉帯水層に同理論を展開するための論点を明らかにする。またその過程で見出した、総湧出量の管理による温泉資源保護の可能性について言及する。

2-1. 滲出を考慮した温泉帯水層流動モデル

上下を不透水層に挟まれ水平に広がり、温度一定で液単相の温泉帯水層から、1口の井戸を用いて一定の体積流量で揚水する問題を考える。温泉帯水層の水頭低下は、揚水井について軸対称で軸方向の変化も無視できる円柱座標系の拡散方程式で記述されるが、その解の1つは Theis の式 (Theis, 1935) として知られる。山下 (1961, 1967) は、この拡散方程式に滲出項を導入して拡張したモデル (Hantush and Jacob, 1954, 1955; Hantush, 1956) を用いて点在する自噴井や他層との間の流出入を表現することで、別府温泉で実施した多数の揚水試験の結果を定量的に説明できることを示した。拡張した拡散方程式は、次のように表される。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) - \frac{b}{T} s = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 s [m] は揚水開始後の経過時間 t [s] と揚水井からの距離 r [m] の関数である水頭低下、 T [m²s⁻¹] は透水量係数、 S [無次元] は貯留係数、 b [s⁻¹] は滲出係数であり、式 (1) の左辺第 2 項が滲出項である。更に、初期条件として式 (2)、境界条件として式 (3) および (4) を次のように与える。

$$s = 0 \quad \text{at } t = 0, r \geq 0 \quad (2)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial s}{\partial r} = -\frac{Q}{2\pi T} \quad \text{at } t > 0 \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} s = 0 \quad \text{at } t \geq 0 \quad (4)$$

ここで、 Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] は揚水量である。つまり、初期状態では水頭低下は一様にゼロであること (式 (2))、検討対象の温泉帯水層のスケールに比較して太さを無視できる井戸から一定の体積流量で揚水していること (式 (3))、そして検討対象の時間スケールの範囲内では温泉帯水層は無限に広がっていると見なして差し支えない程度の広がりを持つこと (式 (4))、を仮定している。

式 (1) ~ (4) を、数値計算などの近似を用いず数学的に厳密に解いた解 (解析解) は、Hantush and Jacob (1955) によって示されている。本研究では、この解析解に従う温泉帯水層の水頭の時間・空間変化を詳細にレビューする目的で、独自にプログラミング言語 Python (バージョン 3.8.1) により解析解の計算と作図を行うコードを開発した。解析解に含まれる変形ベッセル関数と指数積分の計算には、数値計算ライブラリ SciPy (バージョン 1.5.2) を利用した。このコードの検証を目的として、Hantush and Jacob (1955) が図示した解析解を再現したものを図 1 に示す。

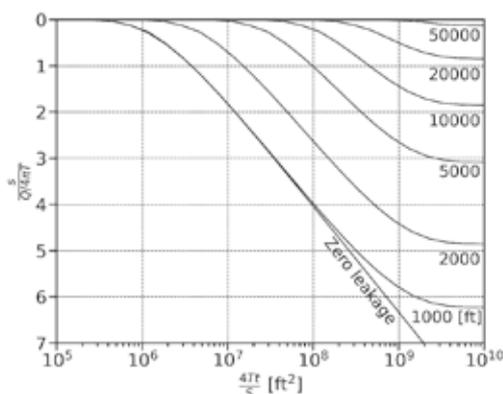


図 1：独自開発のコードによる Hantush and Jacob (1955) の解析解の再現。 $\sqrt{T/b} = 20000$ [ft] とし、種々の位置 r での水頭の経時変化を示す。Zero leakage は Theis の式による $r = 1000$ [ft] での水頭の経時変化。

開発・検証したコードによる、口径 45 mm の揚水井 ($r = 2.25 \times 10^{-2}$ [m]) の水頭の経時変化を図 2a に示す。ここでは、滲出の大きさを表すパラメータ b/T を 10^{-6} m^{-2} から 10^0 m^{-2} まで変化させた各ケースの経時変化と、 $b/T = 0$ とした時に相当する Theis の式による経時変化を併せて示す。この結果から、水頭は当初、滲出の大きさに関わらず経過時間の対数に対して線形的に低下する Theis の式と同一の挙動を示すことが分かる。更に b/T の値に応じた一定時間が経過した時点で線形的な変化から乖離を始め、最終的に一定

値に収束して定常状態に到達することを確認できる。滲出が大きい (b/T が大きい) ほど短時間で定常状態に至り、また水頭の低下は小さく抑えられている。滲出がない場合には、Theis の式に従い限りなく水頭の低下は継続する。

揚水開始後十分に時間が経過して定常状態に到達した後の、揚水井と周辺の水頭の分布を図 2b に示す。ここでも経時変化 (図 2a) と同様に、滲出の大きさを表すパラメータ b/T を 10^{-6} m^{-2} から 10^0 m^{-2} まで変化させた各ケースを示している。経時変化 (図 2a) について考察した通り、定常状態の揚水井 ($r = 2.25 \times 10^{-2} \text{ [m]}$) の水頭は b/T の値に応じて変化する一方、周辺の温泉帯水層では揚水井からの距離の対数に対して共通する一定の傾きで線形的に水頭が上昇していることが分かる。その結果、水頭は b/T の値に応じた一定の距離でゼロに収束すること、つまり揚水による水頭低下の影響半径は有限であることが確認できる。この有限の影響半径は揚水量 Q に依存せず、温泉帯水層の固有パラメータである b/T にのみ依存して定まる点も特筆すべきである。

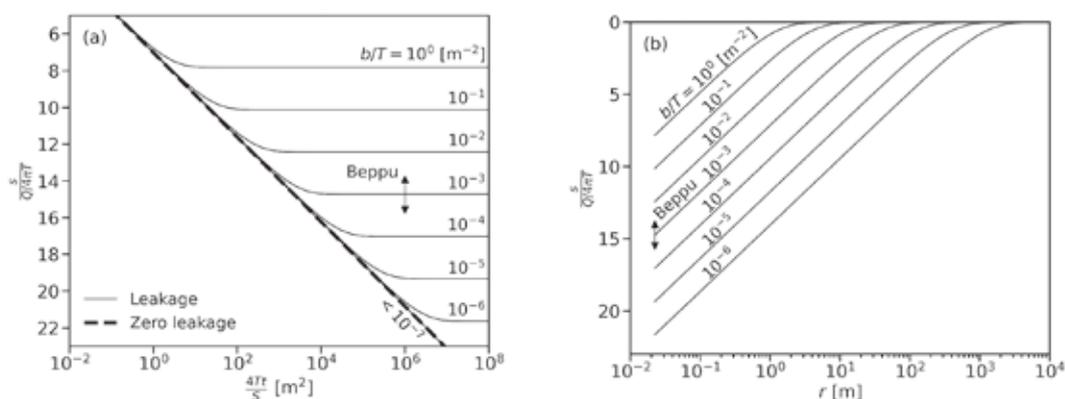


図 2：パラメータ b/T の種々の値に対応する、口径 45 mm の揚水井 ($r = 2.25 \times 10^{-2} \text{ [m]}$) の水頭の経時変化(a)と、定常状態到達後の揚水井と周辺の水頭の分布 (b)。Zero leakage は Theis の式 ($b/T = 0$) による。矢印は、山下 (1961) が別府温泉で評価した b/T の範囲に対応する水頭の概略範囲を示す。

2-2. 滲出項の評価方法

前節では、滲出の大きさを表すパラメータ b/T に応じて、揚水井周辺の水頭低下は有限の影響半径内に限定されることが示された。この結果から、揚水試験により b/T の値が評価されている温泉帯水層では、それに対応する影響半径の倍以上の離隔距離をとって井戸を掘削することで、既存の温泉井の揚水量や湧出量の減少を回避できることが示唆される。更に水頭低下に制限を設ければ、揚水量と揚水井の水頭低下の関係から、この温泉帯水層で揚水井間の干渉を回避しながら可能な単位面積あたりの揚水量 (湧出量) の上限を定義することもできる。なお、山下 (1967) による湧出量の上限 (100 m 平方あたり 120 l min^{-1})

の導出の考え方はこれとは異なり、影響半径内で相互干渉する複数の自噴井の湧出量の総和を考えている。しかしながら、山下(1967)の考え方も影響半径が有限(100 mを仮定)であることに立脚している。以上により、影響半径を決定づけるパラメータ b/T を適切に評価することが、温泉資源を効果的に保護するために重要であると考えられる。

山下(1961)は、別府温泉でパラメータ b/T を2つの方法で評価した事例を示している。1つ目は、定常状態を仮定した上で、揚水井からの揚水に伴う近隣自噴井の湧出量の減少量を調べる方法である。この方法は井戸内の測定作業が不要であるため、定常状態が保証されている限りは簡便で適用範囲が広いと考えられる。2つ目は、揚水開始または停止後の水頭の経時変化のグラフを解析する方法である。これには井戸内の水位(または圧力)測定が必要となるが、その精密な測定により精緻な評価が可能となると期待される。前者の方法に際しても、定常状態を確認するためには井戸内の水位(圧力)測定が必要になること、そして後述の通り温泉帯水層の条件によっては定常状態の実現自体が難しくなる可能性を考えると、状況が許す限り後者の方法が推奨されると考えられる。

揚水開始または停止後の水頭の経時変化のグラフを解析する具体的方法として、横軸に揚水開始(停止)後の経過時間の対数、縦軸に揚水井近隣の井戸の水頭低下をとった片対数グラフを考える。これを理論的に一般化したものが図2aおよび3に相当する。ここで水頭の低下傾向が変化して定常状態に向かい始める変曲点における接線の傾きを m_i 、水頭低下を s_i とすると、次の方程式を解くことでパラメータ b/T を決定できる(Hantush, 1956)。

$$K_0\left(r\sqrt{b/T}\right)\exp\left(r\sqrt{b/T}\right) = 2.3 s_i/m_i \quad (5)$$

ここで、 $K_0(x)$ は0次の第2種変形ベッセル関数、 r は水位測定を行った井戸と揚水井との距離である。山下(1961)が示した別府温泉の事例では、揚水井(No. 433の2)から37 m離れた井戸(No. 430の2)で揚水停止後の水位が測定された。その結果、揚水停止の約10分後に変曲点が出現し、水位測定は約100分後まで継続された。この揚水試験で評価されたパラメータ b/T の値は、 $1.23 \times 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ である。

2-3. 総湧出量の管理による温泉資源保護の可能性

前節で示した滲出の大きさを表すパラメータ b/T の評価の例を、本研究で開発したコードによる図3の $b/T = 10^{-3} \text{ [m}^{-2}\text{]}$ のケースに照らして考える。揚水停止の10分後に変曲点($4Tt/S \approx 2.34 \times 10^3 \text{ [m}^2\text{]}$)が出現したとすれば、 10^2 分後($4Tt/S \approx 2.34 \times 10^4 \text{ [m}^2\text{]}$)にはほぼ定常状態に到達することが分かる。一方 $b/T = 10^{-6} \text{ [m}^{-2}\text{]}$ の場合には理論上の変曲点出現時刻は揚水停止の約5.3時間後($4Tt/S \approx 7.40 \times 10^4 \text{ [m}^2\text{]}$)となるが、Theisの式に従う線形的な変化から乖離するために長時間を要するため、例えば 10^4 分後に相当する約6.9日($4Tt/S \approx 2.34 \times 10^6 \text{ [m}^2\text{]}$)が経過しても、実測データのばらつきを考えれ

ば変曲点を見出すのは容易ではない可能性が高い。このように、幅広い条件を取り得る一般的な温泉帯水層で揚水試験を実施してパラメータ b/T の値を評価する場合、その値が小さい場合には許容可能な試験期間内に変曲点を見出せない可能性がある。つまり、理論上滲出がなく、Theis の式に従うケースと区別が付かなくなる状況を想定する必要がある。変曲点を見出しパラメータ b/T の値を評価できる場合には、有限の影響半径に基づいて揚水井間の干渉を回避できる離隔距離や単位面積あたりの揚水量（湧出量）の上限を定義でき、あるいは山下（1967）の考え方を適用することでも固有の単位面積あたりの湧出量の上限を決定できる。一方 b/T の値を評価できない場合には、もはやこれらの考え方は適用できないため、新たな温泉資源保護の考え方を導入する必要がある。その1つの可能性として、本報告では同一温泉帯水層からの総湧出量を制限する方法を検討する。

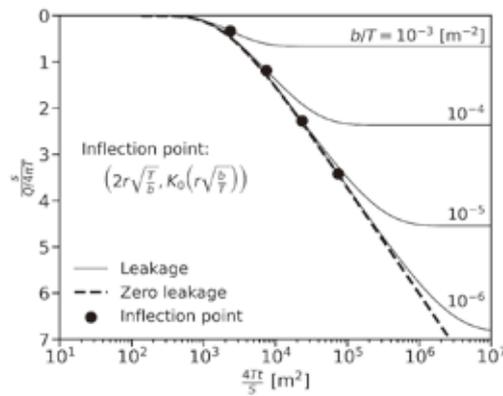


図3：パラメータ b/T の種々の値に対応する、 $r = 37.0$ [m]における水頭の経時変化とその変曲点。Zero leakage は Theis の式 ($b/T = 0$)、変曲点の定義は Hantush (1956) による。

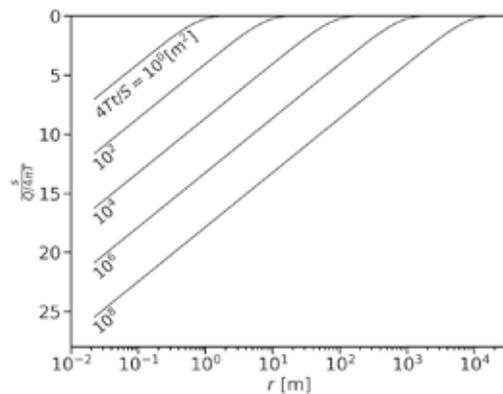


図4：Theis の式 ($b/T = 0$) に従う口径 45 mm の揚水井 ($r = 2.25 \times 10^{-2}$ [m]) と周辺の水頭の分布の経時変化。経過時間が 10^2 倍になる間に影響半径は 10 倍となることから、影響半径が経過時間の平方根に比例して拡大することを確認できる。

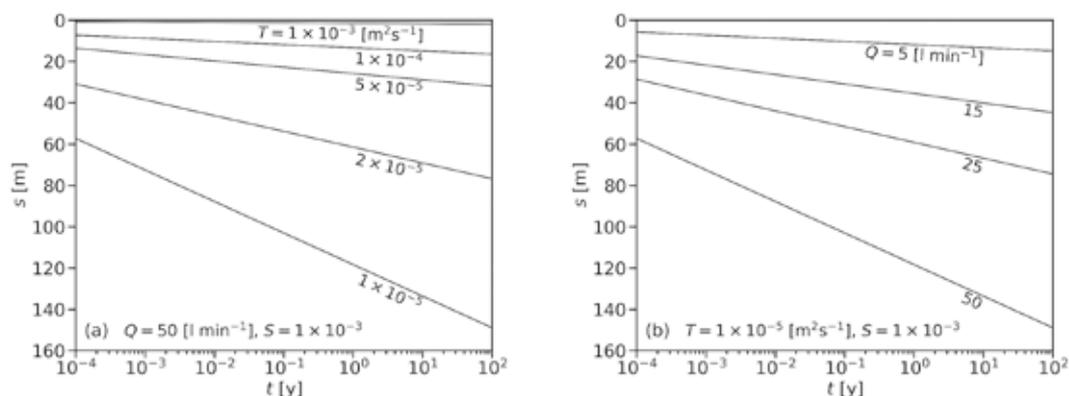


図5：Theisの式 ($b/T = 0$) に従う口径45 mmの揚水井 ($r = 2.25 \times 10^{-2}$ [m]) の水頭の、透水量係数の種々の値に対応する経時変化 (a) と、揚水量の種々の値に対応する経時変化 (b)。

極端な条件として、滲出がなく水頭低下がTheisの式に従うケースを考える。この場合、影響半径は経過時間の平方根に比例して際限なく拡大を続ける (図4)。そのため、干渉を回避できる井戸間の離隔距離や単位面積あたりの揚水量 (湧出量) の上限も原理上定義不可能となる。口径45 mmの揚水井 ($r = 2.25 \times 10^{-2}$ [m]) の水頭の経時変化を図5に示す。ここではTheisの式を用い、一定の揚水量のもとで透水量係数を変化させた場合 (図5a) と、一定の透水量係数のもとで揚水量を変化させた場合 (図5b) を考える。図2aについても考察した通り、Theisの式に従う水頭は、経過時間の対数に対して線形的に限りなく低下し続ける。ただし、限りなく低下し続けることは必ずしも温泉資源の枯渇を示唆するものではなく、低下の程度によっては実質的には安定していると見なせるケースも存在する。例えば図5aに示した透水量係数 T が $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の場合、水頭低下は揚水開始1年後に約14 mであるのに対し、100年後でも約17 mに留まっている。同様に図5bに示した揚水量 Q が 5 l min^{-1} の場合、水頭低下は揚水開始1年後に約12 mであるのに対し、100年後でも約15 mに留まっている。いずれのケースでも1年後から100年後、つまり経過時間が100倍になる間の水頭低下が約3 mとなっている。100年経過した時点から更に水頭が3 m低下するのは、理論上1万年後となる。以上により、滲出がなく水頭低下がTheisの式に従う極端なケースであっても、同一温泉帯水層からの総揚水量 (または総湧出量) を透水量係数および関係するパラメータに応じた適正な範囲内に留めることで、効果的な温泉資源の保護を図れる可能性が示唆される。

3. 計算機シミュレーションによる総湧出量の上限の検討

前章では、滲出の大きさを表すパラメータ b/T を現実的な期間の揚水試験では評価できない場合、同一温泉帯水層からの総揚水量 (または総湧出量) を制限することが、温泉資

源を保護する方法となり得ることが示唆された。本章では、その制限方法を具体化するための問題設定を行い、それを計算機シミュレーションにより再現して検討する。

3-1. 問題設定

山下 (1967) は、別府温泉における現地調査と前章で検討したモデルによる理論計算から、単位面積あたりの井戸数と湧出量の関係を示した。それによれば、自噴井を主とする井戸数が比較的少ない段階では湧出量は井戸数に概ね比例して増加するが、やがてその増加は鈍化する。最終的には、井戸が増えても湧出量は殆ど増えず、頭打ちの状態となる。この結果は、温泉帯水層にはそのポテンシャルとも呼ぶべき固有の湧出量の上限があることを示唆する。本研究ではこの考え方を開発エリア全体の面積に適用することで、温泉帯水層に固有の総湧出量の上限を考える。この総湧出量の上限は、温泉帯水層の透水性や集水域の広がり、地表や他層との間の滲出入など、温泉帯水層の固有の条件により定まると考えられる。井戸が少ない段階では、井戸数、口径、配管内の圧力損失、近接する井戸間の干渉など、人為的な湧出のさせ方が総湧出量の主要な制約条件となる。しかし井戸数の増加に伴い、次第に温泉帯水層が持つ固有のポテンシャルが主要な制約条件となる状態へと移行する。なお山下 (1967) は、調査当時の別府温泉では無理な動力揚湯などにより実際の湧出量がこのポテンシャルを超えている現状を指摘している。

効果的に温泉資源を保護するためには、総湧出量をこのポテンシャルの範囲内に留めることが必要であると考えられる。以上の考察に基づき、計算機シミュレーションにより温泉帯水層と自噴井を連結したモデルを作成し、種々の条件下での井戸数と総湧出量の関係を検討する。それにより、温泉帯水層のポテンシャルを定量的に評価することを試みる。

表 1：計算機シミュレーションの条件

温泉帯水層		初期条件	左列の圧力・比エンタルピで一樣
圧力 [MPa]	8, 10, 12	境界条件	左列の圧力・比エンタルピで一定
比エンタルピ [kJ/kg]	1085.8 (250°C相当)		
浸透率・層厚積 [$\times 10^{-12} \text{ m}^3$]	0.3, 1.0, 10.0	シミュレーション期間 [y]	1.0
空隙率・層厚積 [m]	1.0	時間ステップ数	50000
開発エリアサイズ [km^2]	0.5 ² , 1.0 ² , 2.0 ²	時間ステップサイズ [h]	5.39×10^{-24} –0.184
計算領域サイズ [km^2]	2000 ²		
		格子点数 (全体)	101 ²
井戸 (自噴井)		格子サイズ (全体) [m]	25.0–2.88 $\times 10^5$
井戸数	1, 4, 16, 25		
湧出量 [t h^{-1}]	図 7 の例の通り	格子点数 (井戸周辺, 放射×周方向)	30 \times 10
口径 [inch]	8.5	格子サイズ (井戸周辺) [m]	1.02×10^{-3} –14.7

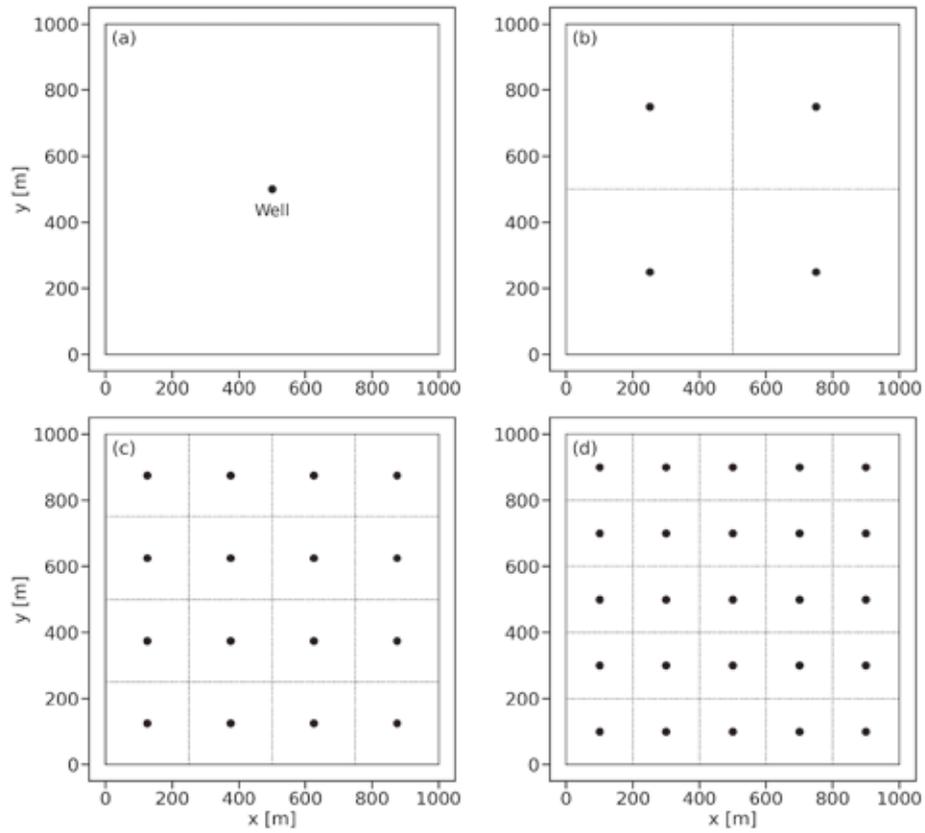


図6：自噴井の配置の例。開発エリアサイズを 1.0^2 km^2 とし、1口 (a)、4口 (b)、16口 (c)、25口 (d) の場合。

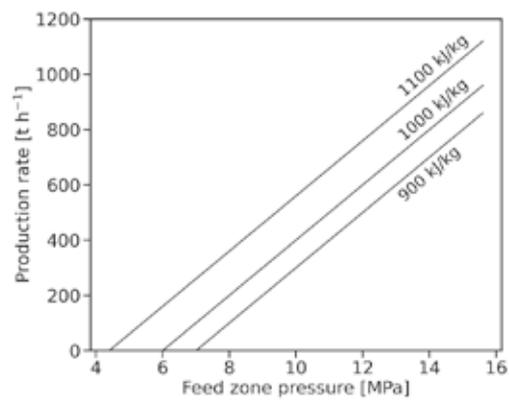


図7：自噴井の湧出量の例。温泉帯水層と接する井戸壁面上の圧力（フィードゾーン圧力）と流入する温泉水の比エンタルピーの関数として定義する。

3-2. 条件

シミュレーションの手法およびコードは Matsumoto (2021) に従う。温泉帯水層の水は液単相で、温泉帯水層からの滲出はないものと仮定する。各種パラメータの値、初期条件、境界条件など、シミュレーションの条件を表 1 にまとめる。1 辺 2000 km の正方形の計算領域の中心部に、開発エリアを設定する。つまり、開発エリアを 1 辺 L [km] の正方形とすると、計算領域の外部境界は開発エリアの外部境界から $1000 - L/2$ [km] に位置する。ここで温泉帯水層に開発エリアから約 1000 km の無限と見なせる広がり仮定することは、揚水試験で評価した透水量係数と貯留係数相当の水頭変化が、試験期間を超える期間も継続すると仮定することを意味する。つまり、揚水に対する水頭の応答を実測に基づいて予測したものであり、温泉帯水層の形状や大きさなどの幾何学的な条件に直接的な制約を与えるものではない。開発エリア内に 1、4、16、25 口の 4 通りの数の自噴井を等間隔に配置する。開発エリアが 1 辺 1 km の正方形の場合の配置を図 6 に示す。

開発エリア内の直交座標系の数値計算格子は等間隔で、格子点数はサイズによらず共通して 41^2 (1681) である。開発エリア外の格子間隔は開発エリアから離れるに従い概ね指数関数的に拡大し、計算領域全体の格子点数は 101^2 (10201) である。それぞれの自噴井周辺には、自噴井近傍の急激な圧力変化を表現するための極座標系の数値計算格子を別途定義している。最も小さい井戸壁面近傍の格子間隔は、約 1 mm である。表 1 に示した通り、4 通りの井戸数に加えて温泉帯水層圧力、浸透率・層厚積、開発エリアサイズのそれぞれを 3 通り考え、合計 108 通りの条件下で 1 年間の温泉帯水層からの湧出を再現した。

自噴井は 8.5 インチの径で温泉帯水層を掘り抜いており、その湧出量は温泉帯水層に接する井戸壁面上の圧力（フィードゾーン圧力）と流入する温泉水の比エンタルピの関数として与えられている（図 7）。その結果、湧出量は温泉帯水層の圧力と比エンタルピに応じて変化する。例えば温泉帯水層の浸透率・層厚積が小さい場合などには、シミュレーションの開始直後にフィードゾーン圧力が急速に低下して湧出量がゼロとなり、自噴が停止するケースがあった。そのような場合には、例えば図 7 に示した湧出量に一定の係数を乗じて湧出量を抑えることで自噴を継続できるように条件を調整した。これは現実の井戸であれば、例えば自噴が難しい場合に大口径から小口径の井戸に変更することに相当する。ここで再現しようとしているのは、井戸の条件によらず、温泉帯水層のポテンシャルが総湧出量の主要な制約条件となる状態であるので、自噴を継続できるように井戸の仕様を変更することは本質的な条件の変更にはあたらない。

図 7 に示すような自噴井の湧出量は、口径、エアリフト管の有無や設置深度、傾斜、内部のスケールの析出状況など、井戸の条件により異なる。井戸内部の流動のモデリングは

例えば地熱井でしばしば行われており、図7は現実の地熱井のモデルを参考に簡略化したものである。表1に示した通り、温泉帯水層の温度は250°Cの1通りのみを考えているが、これは参考にした地熱井が想定していた温度に相当する。図7に示した通り、温泉帯水層の温度を変化させることは主として自噴井の湧出量を変化させることに相当するので、温泉水の粘性が変化することを除けば、計算上は井戸の仕様を変化させることと等価となる。前述の通り井戸の仕様の変更は本質的な条件の変更にはあたらないことから、温泉帯水層内で沸騰が発生しない範囲内では、温度の変更も近似的には本質的な条件の変更にはあたらない。また同じ理由により、温泉帯水層の温度を250°Cとすることは、このシミュレーションの有効性が高温の温泉帯水層に限定されることを意味するものでもない。以上により、温泉帯水層の温度は複数ケースを設定しなかった。

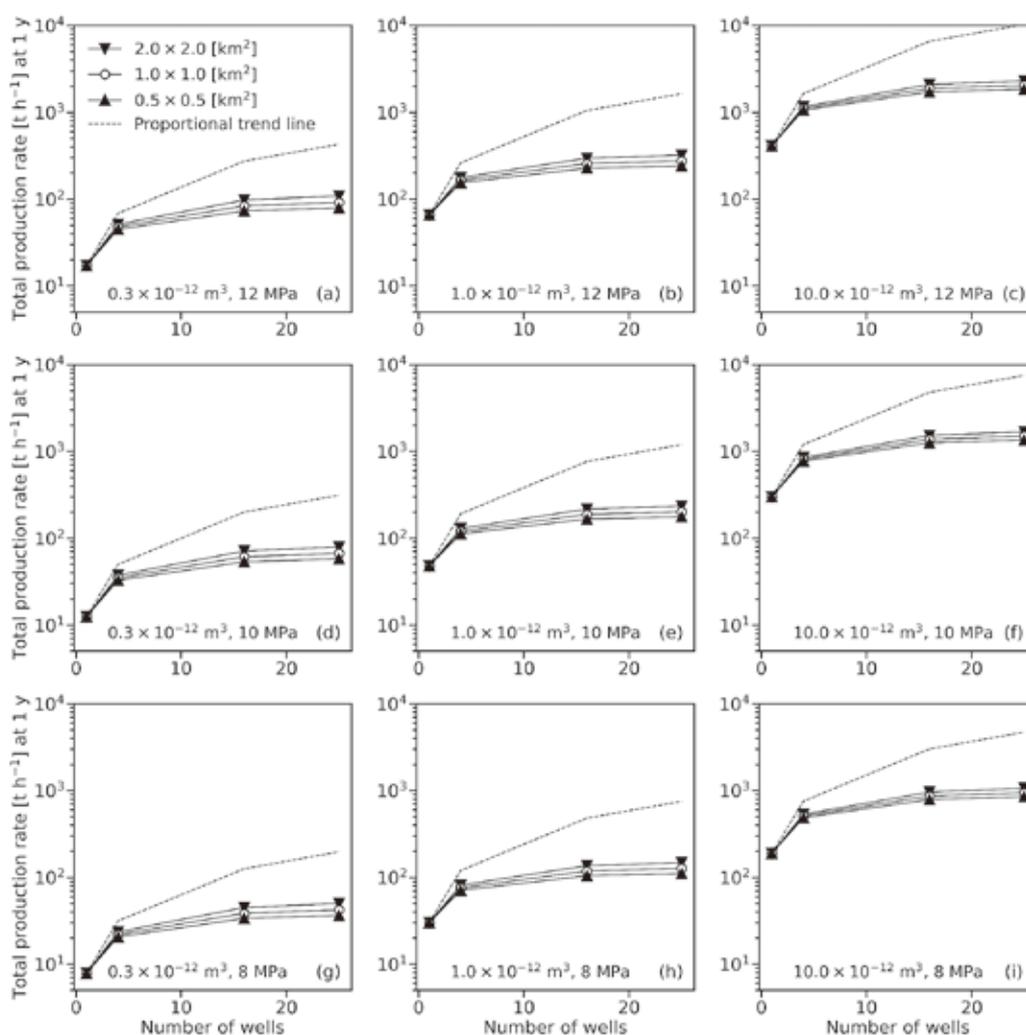


図8： 計算機シミュレーションの結果。浸透率・層厚積、温泉帯水層の圧力、開発エリアサイズ別の、坑井数と総湧出量の関係。破線は、総湧出量が井戸数に比例する場合の変化を示す。

3-3. 結果と考察

全 108 通りのシミュレーション結果を図 8 に示す。ここでは、共通の浸透率・層厚積と温泉帯水層圧力を設定したケース毎に図 8a~8i に分類し、それぞれで井戸数と総湧出量の関係を開発エリアサイズ別に計 27 通り示している。これらの全てのケースで、井戸数の増加に伴って総湧出量が次第に頭打ちに近づく状況が再現された。これは第 3-1 節で考察した通り、井戸数の増加により次第に温泉帯水層のポテンシャルが総湧出量の主要な制約条件となる状態へと移行したことを示すと考えられる。図 8a~8i には、総湧出量が井戸数に比例する場合に得られるはずの変化を破線で示している。この破線とシミュレーション結果との差は、井戸数の増加と共に拡大している。これは、シミュレーションによる総湧出量が、井戸数の増加に伴い頭打ちに近づいている状況を示している。

頭打ちに近づく総湧出量がやがて収束すると予想される上限値は、ケース毎のパラメータに応じて変化した。特筆すべき結果として、総湧出量の開発エリアサイズへの依存性は小さく、開発エリアの面積には比例しないことが示された。すなわち第 2-3 節で考察した通り、滲出がない温泉帯水層のポテンシャルは単位面積あたりの湧出量の形では表現できないと考えられる。例えば図 8c に示した井戸数が 25 口のケースで、開発エリアサイズが 0.5^2 km^2 の場合と 2.0^2 km^2 の場合を比較すると、面積が 16 倍になる間の総湧出量の増加は、1.24 倍に留まっている。これを井戸間の離隔距離の観点で考えれば、開発エリアの拡大に伴い離隔距離が 100 m から 400 m に延長された結果、地下から取り出される温泉量は 1.24 倍に増加している。これは、離隔距離の短縮に伴い井戸間の干渉が大きくなり、各々の湧出量が減少する自噴井の性質による結果である。自噴井を前提とする限り、総湧出量は離隔距離には殆ど依存しない、ないしは離隔距離を大きく取るほど総湧出量は増加すると言える。

浸透率・層厚積に対しては、 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^3$ から $10.0 \times 10^{-12} \text{ m}^3$ に 1 桁増加する間に総湧出量も 1 桁近く増加しており、線形に近い関係を見出すことができる。浸透率・層厚積は、一般に温泉帯水層によって数桁程度変動し得るので、それに応じて総湧出量も数桁程度変動する可能性が考えられる。一方、温泉帯水層圧力に対しても総湧出量の依存性が認められる。ただし、浸透率・層厚積に比べれば、温泉帯水層圧力の変動幅は多くの場合限定的であると考えられる。従って今回検討したパラメータの中では浸透率・層厚積を、温泉帯水層が持つ固有のポテンシャルを決定づける最も重要なパラメータとして位置付けることができると考えられる。

以上により、一定の条件下でのシミュレーションを用いて井戸数の増加に伴って総湧出

量が次第に頭打ちに近づく状況を再現したほか、収束すると予想される上限値の種々のパラメータへの依存性を、定量的に明らかにした。温泉帯水層毎に種々のパラメータを現地調査で明らかにし、ここで示した方法によるシミュレーションを実施することで、その温泉帯水層のポテンシャル、すなわちそこで許される総湧出量の上限を評価することができると考えられる。

4. 簡便な計算式の検討

前章の計算機シミュレーションにより、温泉帯水層が持つ固有のポテンシャル（許容可能な総湧出量の上限）を定量的に評価できる可能性が示された。温泉帯水層毎にこのポテンシャルを適切に評価し、総湧出量をその水準以下に抑えることで、効果的な温泉資源の保護が可能となると期待される。ただし、現実の手續において都度シミュレーションを実施することは容易ではない可能性も考えられるため、実用性の観点からより簡便な評価手法が望まれる。本章では、前章で示されたシミュレーションとその基礎となる設定問題を踏まえ、簡便な計算式を定義して温泉帯水層のポテンシャルを算出することを試みる。

4-1. 問題設定

前章と同様に、温泉帯水層に多くの自噴井を掘削した結果、総湧出量が頭打ちになった状況を考える。一般に井戸が自噴を継続できるためには、温泉帯水層に接する井戸壁面上の圧力（フィードゾーン圧力）が、井戸毎に定まる固有の下限値以上である必要がある。したがって、簡単のため全ての井戸の下限値が等しいと仮定すれば、この状況下における開発エリア内の温泉帯水層の圧力分布は、その下限値で一様であると近似的に考えることができる。例えばここに新たに1口の自噴井を掘削し、エアリフトなどにより自噴誘導することを考える。自噴誘導に伴う揚水によって、温泉帯水層に接する井戸壁面上の圧力（フィードゾーン圧力）が自噴可能な下限値を下回ってしまう。その結果、もはや自噴に至ることは不可能となるので、これ以上自噴井を増やすことはできない。この状況下における開発エリア内とその周辺の温泉帯水層の模式的な圧力分布を図9に示す。

図9に示した模式図の考え方に基づいて、温泉帯水層のポテンシャルを算出する簡便な計算式を導出することを試みる。温泉帯水層の水は液単相であると仮定とする。半径 r_{ex} の円形の開発エリア内部の温泉帯水層では、井戸が自噴可能な下限値 P_L まで一様に圧力が低下していると仮定する。この圧力の下限値 P_L は、現実には口径などの井戸の仕様に依存する。しかし実用上の観点からは、井戸に依存しない温泉帯水層固有の条件に基づいて値を決定することが望まれる。そこで、温泉帯水層を比エンタルピ一定の条件下で減圧し、沸騰が開始する圧力を P_L とする。圧力の下限値 P_L が沸騰開始圧力を下回ることは、開発エ

リア全体にわたって温泉帯水層で沸騰が発生することを意味する。その結果、溶存成分が液相に濃集・析出し、開発エリア全体の温泉帯水層の透水性が不可逆的に損なわれる恐れがある。このような状況を回避するため、 P_L を沸騰開始圧力とする。なお、現実の温泉帯水層の透水性は不均質性が高いことがある。その結果、掘削した場所の透水性が偶然低いために井戸周辺で局所的に大きな圧力損失が発生し、沸騰に至るケースもあり得る。これは温泉帯水層全体が沸騰する状況とは異なるので、許容可能とする。温泉帯水層全体を代表する圧力は、湧出を伴わない観測井の圧力(または水位)モニタリングにより把握する。

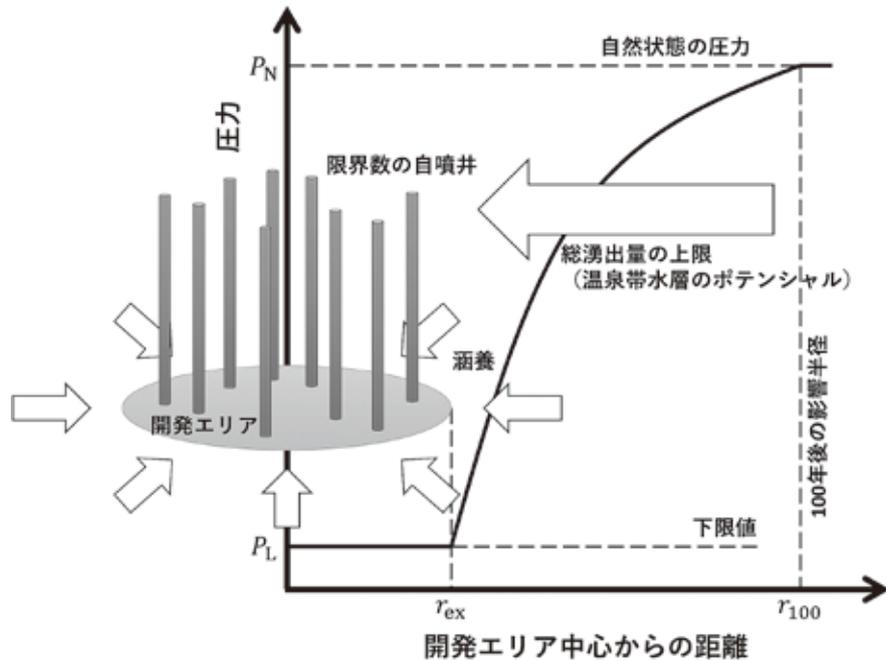


図9：限界数まで自噴井を掘削した、開発エリア内とその周辺の温泉帯水層の模式的な圧力分布。この状況下の総湧出量が理論上可能な上限となり、温泉帯水層のポテンシャルに相当する。

開発エリアから十分に離れた場所では、自然状態の圧力 P_N が保持されていると仮定する。第3-2節で言及した通りここで考えている開発エリアからの距離も、例えば地図上で2地点間を直線で結んで定義できるような、必ずしも幾何学的な意味を持つものではない。開発エリア外部の領域は、揚水試験で評価した透水量係数と貯留係数相当の圧力変化が、試験期間を超える期間も継続すると仮定し、それを表現する数学的手法として設定したものである。その上で、一定の「距離」だけ離れた場所で温泉帯水層の圧力が保持されているという仮定は、時間の経過とともに拡大する影響半径(図4)がその「距離」に到達した時点で、それ以上温泉帯水層の圧力が低下しなくなることを意味する。ここでは、この距離を100年の期間に相当する影響半径 r_{100} と定義する。後述の定義式(式(6))から明らかであるように、この影響半径を大きく設定するほど温泉帯水層のポテンシャルは小さく

評価される。温泉帯水層のポテンシャルの影響半径への感度については、後で検討する。

開発エリアの中心からの距離 r_{ex} および r_{100} と、それぞれに対応する圧力 P_L および P_N を定義した。更に開発エリアに向かう温泉水の流れが定常流であると仮定すれば、その質量流量 M [kg s^{-1}] (つまり、温泉帯水層のポテンシャル) は次のように与えられる。

$$M = 2\pi\rho \frac{kh}{\mu} \frac{(P_N - P_L)}{\ln(r_{100}/r_{ex})} \quad (6)$$

ただし、

$$r_{100} = 2 \sqrt{\frac{kh/\mu}{\phi ch}} t_{100} \quad (7)$$

ここで、 ρ [kg m^{-3}] は温泉水の密度、 k [m^2] は温泉帯水層の浸透率、 h [m] は温泉帯水層の層厚、 μ [Pa s] は温泉水の粘性係数、 ϕ [無次元] は温泉帯水層の空隙率、 c [Pa^{-1}] は温泉水の等温圧縮率、 t_{100} [s] は100年後の経過時間(秒数)である。なお、これらのパラメータは式(1)に含まれる透水量係数 T とは $T = \rho g k h / \mu$ 、貯留係数 S とは $S = \rho g \phi c h$ の関係にある。 g [m s^{-2}] は重力加速度である。式(1)が温泉帯水層の水頭に関する形式を取るのに対し、圧力に関する形式もしばしば用いられる(例えば、Dake, 1978)。圧力に関する形式を取る場合、一般に透水量係数として kh/μ 、貯留係数として ϕch が用いられる。式(6)および(7)は圧力に関する形式に基づくことから、以下では必要に応じて定義を明示した上で、原則として透水量係数は kh/μ 、貯留係数は ϕch を意味する。温泉水の密度 ρ 、沸騰開始圧力 P_L 、粘性係数 μ の計算には純水を仮定し、the International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)による状態方程式 IAPWS-IF97 (IAPWS, 2001, 2004a, 2004b, 2005, 2007) と経験式 (IAPWS, 1997) を用いた。

以上により、温泉帯水層のポテンシャル M を算出する簡便な計算式の一案を導出した。なお、 M を式(6)および(7)により算出するために必要となる開発対象の温泉帯水層および開発エリアに関する情報は、自然状態の温泉帯水層の圧力と温度、浸透率・層厚積(または透水量係数)、貯留係数、開発エリアの面積(円形を仮定して r_{ex} を算出)となる。

4-2. 結果と考察

種々の条件下で式(6)および(7)を計算した結果を図10にまとめる。図10a~10dのそれぞれに示した太い実線は共通するリファレンスケースを示しており、温泉帯水層の圧力と温度をそれぞれ10 MPa、250°C、貯留係数(ϕch)を $10^{-7} \text{ m Pa}^{-1}$ 、開発エリアの半径を3 kmとしている。図10a~10dでは、それぞれリファレンスケースを基準として温泉帯水層の圧力、温度、貯留係数(ϕch)、開発エリアの半径を変化させた場合の、浸透率・層厚積と温泉帯水層のポテンシャル(許容可能な総湧出量の上限)の関係を示している。

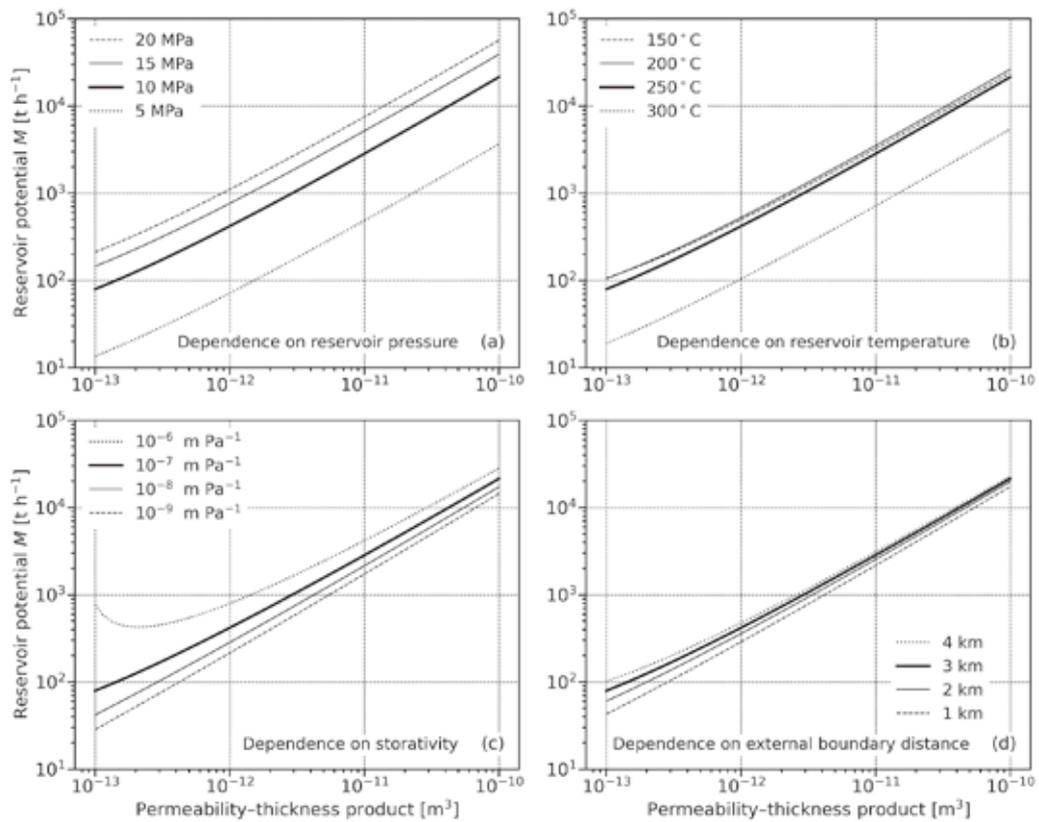


図 10：種々の条件下の式 (6) および (7) の計算結果。太い実線は、共通するリファレンスケースを示す（温泉帯水層圧力 10 MPa、温度 250°C、貯留係数 (ϕch) 10^{-7} m Pa $^{-1}$ 、開発エリア半径 3 km）。

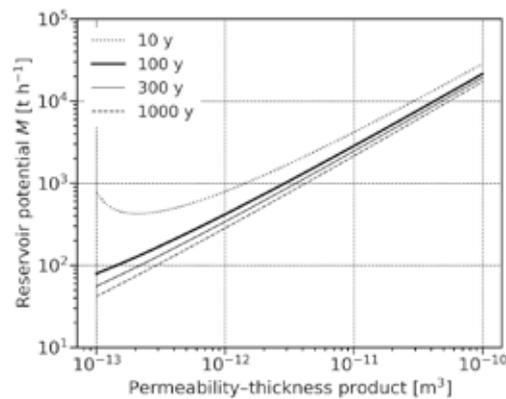


図 11：自然状態の圧力 P_N が保持されている距離の変化に伴う浸透率・層厚積と温泉帯水層のポテンシャルの関係の変化。10、100、300、1000 年の各期間に相当する影響半径を仮定。

式 (6) および (7) により算出される温泉帯水層のポテンシャルは、第 3 章で示したシ

シミュレーションの結果から収束すると予想される総湧出量と、概ね整合的である。またシミュレーションの結果と同様に、温泉帯水層のポテンシャルは開発エリアの面積には比例しないことも示している（図 10d）。温泉帯水層のポテンシャルと浸透率・層厚積の関係が線形に近いことも、シミュレーション結果と整合的である。条件によっては、温泉帯水層の圧力と温度、貯留係数（ ϕch ）に対しても比較的大きな依存性を持っている。温泉帯水層の温度が 300°C の場合に、他のケースよりも温泉帯水層のポテンシャルが大きく減少しているのは（図 10b）、温泉帯水層の圧力の下限値 P_L （沸騰開始圧力）が 300°C の場合には 8.59 MPa と、他のケースに比べて特に高い値となるためである（150°C: 0.48 MPa、200°C: 1.56 MPa、250°C: 3.98 MPa）。また貯留係数（ ϕch ）が $10^{-6} \text{ m Pa}^{-1}$ で浸透率・層厚積が 10^{-13} m^3 程度の比較的小さい場合に、浸透率・層厚積の減少に伴って温泉帯水層のポテンシャルが増加しているのは（図 10c）、式（7）を用いて浸透率・層厚積と貯留係数（ ϕch ）から算出される 100 年の経過時間に相当する影響半径 r_{100} が非常に小さく評価されたためである。この効果が浸透率・層厚積の減少により温泉帯水層のポテンシャルを減少させる効果を上回ったため、むしろ浸透率・層厚積の減少に伴って温泉帯水層のポテンシャルが増加する結果となったと考えられる。

式（6）の導出に際し、温泉帯水層の自然状態の圧力 P_N が保持されている十分遠方の距離として、100 年の期間に相当する影響半径 r_{100} を定義した。図 11 は、異なる期間に相当する影響半径を用いた場合の温泉帯水層のポテンシャルの評価結果を示している。太い実線は、図 10 に示したリファレンスケースを示しており、それを基準として影響半径を変化させた。1000 年間の影響半径を採用したケースを 100 年間のケースと比較すると、評価される温泉帯水層のポテンシャルは、例えば浸透率・層厚積が 10^{-12} m^3 の時で 0.68 倍、 10^{-11} m^3 の時で 0.76 倍に小さくなる。温泉帯水層のポテンシャルの浸透率・層厚積への依存性の大きさと、現実の揚水試験などで評価される浸透率・層厚積の値の一般的なばらつきを考えれば、この程度の差異は多くの場合無視できると考えられる。

最後に、式（6）および（7）により評価される温泉帯水層のポテンシャルに基づく総湧出量の管理による温泉資源保護の考え方が、従来参照されて来た考え方に比較して厳しいものであるのか否か検討する。山下（1967）が示した基準である 100 m 平方あたり 120 l min^{-1} の湧出量に基づき、図 10d に示した開発エリアの面積で許される総湧出量を温泉帯水層の水の密度を考慮して質量流量で算出した。その結果は、開発エリアの半径が 1、2、3、4 km のそれぞれの場合に対応して、 1.82×10^3 、 7.29×10^3 、 1.64×10^4 、 $2.92 \times 10^4 \text{ t h}^{-1}$ となる。これを図 10d と比較すると、多くの場合に式（6）および（7）により算出される温泉帯水層のポテンシャルの方が小さな値となることが分かる。従って、本報告が示した

温泉帯水層のポテンシャルに基づく総湧出量の管理による温泉資源保護の考え方は、従来参照されて来た考え方と比較しても過大な湧出量を許すものではないと考えられる。

5. まとめ

本報告ではまず、温泉資源保護のための重要な指針を導いた山下(1967)が基礎とした、滲出を考慮した温泉帯水層流動モデルの理論を再現・レビューした。その結果、滲出により揚水の影響半径が有限となること、そして山下(1967)の湧出量の基準(100 m 平方あたり 120 l min^{-1})も、この有限の影響半径を前提としていることを確認した。温泉帯水層の滲出が小さいためにその大きさを示すパラメータを揚水試験で評価できない場合も含め、幅広い条件下に適用できる温泉資源保護の考え方の1つの可能性として、同一温泉帯水層からの総湧出量を制限する方法を検討した。

総湧出量の制限方法の考え方として、滲出がない温泉帯水層で自噴井の増加に伴って総湧出量が次第に頭打ちに近づく状況を想定した。その状況下で可能な最大の総湧出量を温泉帯水層のポテンシャルと定義し、これを許容可能な総湧出量の上限とした。108通りの計算機シミュレーションにより、種々の条件下で想定通り井戸数の増加に伴って総湧出量が頭打ちに近づく状況が再現された。また、温泉帯水層のポテンシャルは開発エリアの面積には比例しないこと、そして浸透率・層厚積と線形に近い関係にあることなどが明らかとなった。

実用性を向上させるため、温泉帯水層のポテンシャルを算出するための簡便な計算式を導出し、計算機シミュレーションとの整合性を確認した。最後に、温泉帯水層のポテンシャルに基づく許容可能な総湧出量の上限は多くの場合、山下(1967)が示した基準(100 m 平方あたり 120 l min^{-1})よりも小さくなることから、従来参照されて来た考え方と比較しても過大な湧出量を許すものではないことを確認した。

記号の説明

b	滲出係数 [s^{-1}]
c	等温圧縮率 [Pa^{-1}]
g	重力加速度 [m s^{-2}]
h	層厚 [m]
$K_0(x)$	0次の第2種変形ベッセル関数 [無次元]
k	浸透率 [m^2]
M	温泉帯水層のポテンシャル(許容可能な総湧出量の上限) [kg s^{-1}]
m_i	変曲点における接線の傾き [m]

P_L	温泉帯水層の圧力の下限値（沸騰開始圧力） [Pa]
P_N	温泉帯水層の自然状態の圧力 [Pa]
Q	揚水量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
r	揚水井からの距離 [m]
r_{ex}	開発エリアの半径 [m]
r_{100}	100年後の影響半径 [m]
S	貯留係数 ($S = \rho g \phi c h$) [無次元]
s	水頭低下 [m]
s_i	変曲点における水頭低下 [m]
T	透水量係数 ($T = \rho g k h / \mu$) [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
t	経過時間 [s]
t_{100}	100年後の経過時間（秒数） [s]
μ	粘性係数 [Pa s]
ρ	密度 [kg m^{-3}]
ϕ	空隙率 [無次元]

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設の大沢信二教授より、研究の改善に資する多くの貴重なコメントを頂きました。また貯留層技術者の権守宏明氏からも多くの技術的な助言を頂いたほか、計算機シミュレーションの実行と結果の整理のお手伝いを頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Dake, L.P. (1978) Fundamentals of reservoir engineering. Developments in petroleum science, 8, Elsevier, 443p.
- Hantush, M.S. (1956) Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Trans. AGU, 37, 702–714.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E. (1954) Plane potential flow of ground water with linear leakage. Trans. AGU, 35, 917–936.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E. (1955) Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Trans. AGU, 36, 95–100.
- IAPWS (1997) Revised release on the IAPS formulation 1985 for the viscosity of ordinary water substance. IAPWS, 15p.
- IAPWS (2001) Supplementary release on backward equations for pressure as a function of

enthalpy and entropy $p(h,s)$ to the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. IAPWS, 13p.

IAPWS (2004a) Revised supplementary release on backward equations for the functions $T(p,h)$, $v(p,h)$ and $T(p,s)$, $v(p,s)$ for Region 3 of the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. IAPWS, 22p.

IAPWS (2004b) Supplementary release on backward equations $p(h,s)$ for Region 3, equations as a function of h and s for the region boundaries, and an equation $T_{\text{sat}}(h,s)$ for Region 4 of the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. IAPWS, 34p.

IAPWS (2005) Supplementary release on backward equations for specific volume as a function of pressure and temperature $v(p,T)$ for Region 3 of the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. IAPWS, 35p.

IAPWS (2007) Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. IAPWS, 49p.

Matsumoto, M. (2021) An approach for estimating geothermal reservoir productivity under access limitations associated with snowy and mountainous prospects. In: Geothermal Energy (B.I. Ismail, ed.), IntechOpen, chpt. 5, DOI: 10.5772/intechopen.96314.

Theis, C.V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Eos Trans. AGU, 16, 519–524.

山下幸三郎 (1961) 自噴井群における揚水の影響について. 大分県温泉調査研究会報告, 12, 31–40.

山下幸三郎 (1967) 別府温泉の泉源保護について (I) 別府旧市内温泉群について. 大分県温泉調査研究会報告, 18, 19–24.

培養細胞系におけるがん細胞株に対する抗ガン剤 抗腫瘍効果の温度依存性の検討

九州大学病院別府病院 内科
前田 豊 樹

緒言：申請者らは平成24年から平成26年に別府市の65歳以上1万人超を対象とした温泉利用と既往疾患の疫学調査を行い、その解析結果から温泉入浴習慣ががん患者の生存延長につながる可能性を見出した。このことは、温泉入浴習慣が、がん罹患したとしても、そこから回復し生き延びる可能性を高めることを示しており、がん治療効果を高めていることが窺える。一方、申請者の所属する九州大学病院別府病院には深部体温上昇効果が高い鉱泥浴入浴設備が設置されている。鉱泥浴では1～2度の深部体温上昇が図れ、浴後2時間以上にわたって体温上昇が続く。蒸気の知見から、この温泉治療と従来のがん治療との併用によりがん治療効果の向上を図れる可能性があるのではないかと考えた。この可能性を探るべく手始めに、がん細胞培養系を用いて抗がん剤存在下の高温培養での抗がん効果上昇の有無を確認することを着想した。

方法：正常細胞コントロール申請者の所属する研究室で扱われている臍帯静脈上皮細胞(HUVEC)とKMST-6(肺がん細胞株)、SLVL(Bリンパ球細胞株)、Jurkat(Tリンパ球細胞株)を理研バンクより入手し、それぞれの細胞に推奨される培養条件で抗がん剤(Ara-C)を0, 100, 400 μ モルの濃度に添加し、37度と39度の異なる温度条件でAra-C添加後1, 3, 6日後に細胞の増殖率、生存率の推移を確認した。

結果：各細胞ごとに6枚の3cmシャーレに 3×10^5 ずつ細胞を撒き(0日目)、それを1として、温度条件、AraC濃度を変えて、1, 3, 6日目の細胞数(確認細胞数 \times 生存率)を比率で確認し、6枚のシャーレの平均で比較した(表1)。37 $^{\circ}$ C、39 $^{\circ}$ Cの比較で、正常コントロールのHUVECでは、温度による増殖率の変化はAra-Cの存在いかんに関わらず認められなかった。3種の細胞株との比較解析は、AraCの最終効果を見る意味で培養最終日である6日目における増殖率について細胞毎の温度による差の検討を行った(表2)。その結果、KMST-6ではAra-Cの濃度によらず、高温(39 $^{\circ}$ C)で有意な増殖抑制が認められる。Jurkatでは高温による増殖抑制増強効果は見られなかった。SLVLではAra-C非存在下においては高温による増殖抑制効果はないが、Ara-Cの増殖抑制を有意に増強する効果が見られた。

考察・結論：温度効果、抗がん剤 (Ara-C) の効果 は、解析した 3 種の細胞株で三者三様であった。温度効果のないもの、温度効果はあるが、抗がん剤の有無と関係が見られないもの、一見温度効果はないが、抗がん剤存在下で高温による増殖抑制効果が増強されるものが見られた。このことは、癌腫によっては抗がん治療に温熱療法を併用することで治療効果が高まる可能性を示していると考えられる。

表 1 温度別の臍帯静脈上皮細胞(HUVEC)の増殖率に対する抗がん剤(Ara-C)の効果

培養日数		1 日間		3 日間		6 日間	
Ara-C 濃度	温度	増殖率	p 値	増殖率	p 値	増殖率	p 値
0 μ M	37 $^{\circ}$ C	2.30 \pm 0.29	0.769	3.08 \pm 0.92	0.185	4.31 \pm 0.73	0.115
	39 $^{\circ}$ C	2.21 \pm 0.65		2.48 \pm 0.40		3.39 \pm 1.05	
100 μ M	37 $^{\circ}$ C	1.35 \pm 0.13	0.755	0.86 \pm 0.39	0.720	1.43 \pm 0.35	0.333
	39 $^{\circ}$ C	1.42 \pm 0.48		0.97 \pm 0.62		1.21 \pm 0.40	
400 μ M	37 $^{\circ}$ C	1.03 \pm 0.23	0.611	1.08 \pm 0.29	0.402	1.14 \pm 0.57	0.740
	39 $^{\circ}$ C	1.11 \pm 0.29		1.29 \pm 0.50		1.04 \pm 0.40	

p 値は 37 $^{\circ}$ C と 39 $^{\circ}$ C での比較を示す。

表 2 培養温度変化に伴う各細胞の 6 日間培養後の Ara-C 添加による増殖率変化の比較

Ara-C	37 $^{\circ}$ C 6 日間		39 $^{\circ}$ C 6 日間培養		37 $^{\circ}$ C-39 $^{\circ}$ C間の比較	
	0 μ M	400 μ M	0 μ M	400 μ M	0 μ M	400 μ M
	増殖率	増殖率	増殖率	増殖率	p 値	p 値
HUVEC	4.31 \pm 0.73	1.14 \pm 0.57	3.39 \pm 1.05	1.04 \pm 0.40	0.115	0.740
KMST-6	11.79 \pm 3.40	6.10 \pm 3.15	5.47 \pm 0.96	2.56 \pm 0.75	0.005	0.039
Jurkat	16.01 \pm 2.29	0.35 \pm 0.12	15.05 \pm 1.36	0.50 \pm 0.10	0.403	0.039
SLVL	9.17 \pm 0.41	1.73 \pm 0.30	8.27 \pm 1.13	1.10 \pm 0.21	0.114	0.002

以上

別府南部朝見川断層沿いの地下構造

京都大学

竹村 恵 二

電力中央研究所

木村 治 夫

ふじのくに地球環境史ミュージアム

中西 利 典

摘要

別府温泉の利活用等を考察する上で、現在の水文学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。本報告では別府扇状地の南端を画し、別府地溝の南縁を限る朝見川断層について、地形情報、地下地質、物理探査情報から、断層沿いの地下構造についてまとめた。

はじめに

一般的に扇状地内の地下構造調査は、地表面付近に厚く分布する礫がちの地層の影響で、地表面付近における物理探査は困難な点も多い。現在の地質学的知見から、別府扇状地を含む別府地溝（由布一鶴見地溝；星住ほか，1988）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が存在することが推定される。これらの地層がどの深さでどのような分布をするかを種々の地球科学的探査の成果をまとめて、別府地域の地下構造を推定する研究の継続が必要である（竹村，2020・2021）。2019年度と2020年度に、別府地溝内の地下構造のまとめを実施したが、今回は別府地溝の南縁を限り、地下温泉水の流動とも大きく関係した朝見川断層を対象に断層沿いの地下構造について、地下レーダー探査（GPR探査）および断層沿いの沖積層を主としたボーリング等による地下地質情報を報告する。

朝見川断層とは

別府扇状地の南縁を限る朝見川断層（首藤・日高，1971）は、別府市街地の南縁の急崖に沿い、鶴見岳東麓から別府湾南岸に伸びる断層で、南側隆起（北側低下）の変位成分を有する。この別府市街地南方の断層は、別府温泉の温泉脈等の関連で注目されてきた（鈴木，1937など）。また、この断層による変位として比高30mの低断層崖が記載される（池田，1979）など、活断層としての地形学的研究が進められてきた。さらに、地質学的情報を利用した変位量に関して、60万年前の由布川火砕流の別府扇状地下分布と断層の南方山地での分布（下限標高）を用いて約285mの高度差があることが報告されている（竹村・檀原，1993）。別府湾をとりまく地域の地質構造との関連で、朝見川断層を中央構造線の横ずれ運動による別府湾堆積盆地の形成に関連したプリアパート盆地の南西端の正断層であることなども指摘された（竹村ほか，1993；Itoh *et al.*,

1998)。さらに、朝見川断層の活動性に関して、堀田地区の東九州高速道路工事に伴い、従来高位扇状地面とされた段丘堆積物から鬼界アカホヤ火山灰(K-Ah:町田・新井, 2003)が確認され、活断層の活動性(特に変位速度)が大きくなることが報告され(千田, 1995)、従来の堀田断層との連続性から堀田-朝見川断層群として評価することが報告され、その後の朝見川断層の研究にとって重要であった。

1995年の兵庫県南部地震以降、活断層と地震の関連での防災・減災等に関連して、断層周辺の構造、活動性、最新活動時期などの情報が収集されてきた。特に国による地震調査研究推進本部等が主導する関連調査研究の成果として、交付金による別府一万年山断層帯の調査(大分県, 1999など)、活断層重点調査による別府一万年山断層帯(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017)等が実施され、これらにより多くの朝見川断層に関する情報が蓄積され、主要活断層としての評価等(地震調査研究推進本部, 2005など)が実施された。

朝見川断層の地表分布に関しては、現時点で、国土地理院発行の都市圏活断層図(千田ほか, 2000; 岡田ほか, 2000など)が一般的に利用可能であり、**図1**に示す活断層重点調査(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017)のまとめに掲載された分布図も有用である。朝見川断層は、現在は、堀田断層との関係をまとめて一体の堀田-朝見川断層として記述されることが多い(大分県, 1999など)。また、地震調査研究推進本部等が評価する主要活断層帯としては、別府一万年山断層帯の大分平野-由布院断層帯東部(地震調査研究推進本部)や別府地溝南縁断層帯(大分県)の構成断層として記述され、被害想定等もこれらの断層帯として評価されてきた。最近、活断層重点調査結果(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017)等の成果も含めて、中央構造線断層帯の西端活動区間:豊予海峡-由布院区間としての評価がなされており(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017)、活断層としての評価と地震活動や被害想定等の関連も地域の防災減災にとって課題となることも考慮すべき断層である。また、朝見川断層の紹介として、「大分県の天然記念物」(大分県, 2021)に掲載されている。

ここでは、特に浅層での調査に基づく、断層沿いの地下構造について、地下レーダー探査および断層沿いの沖積層を主としたボーリング等による地下地質情報を紹介する。



図1 別府地域の活断層分布 (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017)。

物理探査 (地下レーダー探査) によって得られた朝見川断層近傍の極浅部地下構造

地下レーダー探査とは、制御された電磁波を地表から地中へ向けて送信し、電磁的性質の異なる媒質の境界面 (例えば、層理面や断層面) で反射した電磁波を地表で受信することにより、地下構造を可視化する探査法である。主に土木・建築分野で埋設物や空洞などの探査法として確立された技術で、近年では地雷検知や遺跡調査等にも活用されている (例えば、Daniels ed., 1996; 物理探査学会, 2016)。地球科学では、堆積学分野での地下浅部 (数 m~10m 程度) の堆積層の可視化への有効活用が特筆される (例えば、Neal, 2004)。こうした地下浅部の堆積層を可視化することにより、断層に関連し

た変位・変形の検出も可能となることから、活断層研究への適用も国内外で進められている (Gross *et al.*, 2004; 木村・谷口, 2015)。そこで、朝見川断層近傍の地下レーダー探査断面を取得することにより、断層運動に関連した詳細な地下地質構造について検討した。

朝見川断層では、別府市立南小学校南西方の朝見地点 (図 2) および東別府駅北西方の浜脇地点において、ボーリング掘削地点と近接した測線での地下レーダー探査が実施されている (Nakanishi *et al.*, 2016; Kimura *et al.*, 2019)。本稿ではとくに、より詳細な結果が得られた朝見地点の地下レーダー断面を用いて、朝見川断層近傍の極浅部地下構造について議論する。

Kimura *et al.* (2019)によって実施された地下レーダー探査の測線は、東北東-西南西走向の朝見川断層とほぼ直交する、南北約 90 m の区間である (図 2 (b))。さらに、本測線の北端からの距離 50 m 付近ではボーリング調査も実施され、詳細な地下層序が得られている。探査では、中心周波数 50 MHz の送受信アンテナを備えたシステムが用いられた。これは、埋設管や遺跡調査で使用される探査システム (通常は 100 MHz より高い周波数帯域の電磁波を用いることが多い) に比べて低周波の電磁波を用いることで、分解能は劣るものの、より地下深部までのイメージングを可能とするものである。大分平野の府内断層でも同様の探査システムが使用され、地表からの深度約 10 m までの地下構造が明らかにされている (中西ほか, 2019)。

地下レーダー探査によって得られた断面を図 3 に示す。測線北端から距離約 65 m まででは別府扇状地内のほぼ平坦な区間であるのに対して、距離約 65 m から測線南端までは南方の山地へ登っていく坂路であり、これらの境界付近に朝見川断層が認められている (千田ほか, 2001; 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017; 図 2 (b))。本測線においては、地表からの深度約 7 m (標高約 -2 m に相当) まで、多くの強いレーダー波反射面が見られ、詳細な地下構造が得られている (図 3 (a))。測線北端から距離約 65 m までの標高 2 m 付近にはほぼ水平な反射面が見られるが、扇状地-山地境界に近い領域 (距離約 25~60 m) では、より深くなるほど反射面は南方へ大きく傾斜する (図 3 (a) および (b) の Horizon 1~4)。一方、距離約 65 m から測線南端では、反射面の傾斜方向によって、上位から Unit A (北傾斜)、Unit B (南傾斜)、Unit C (水平) に分けることができる。

こうした地下レーダー探査断面の特徴と、測線に近接して掘削されたボーリング調査の結果 (図 3 (b)) や既存の地質情報から、朝見川断層朝見地点での極浅部地下構造は次のように考えられる。まず、朝見川断層の地表位置と、探査断面内の反射面の特徴 (途切れ・食い違いや急激な傾斜変化) から、図 3 (b) の距離約 60 m 付近の太破線の場所に朝見川断層 (極浅部地下部分) が存在すると考えられる。また、朝見川断層の相対低下側にあたる断面北部~中部では、Horizon 1 が位置する標高約 2 m よりも上方には盛土・埋土が分布し、標高約 2 m 以深には完新世の氾濫原堆積物が分布することが、ボーリング調査から明らかになっている。したがって、南傾斜する Horizon 2~4 は氾濫原堆積物の構造をあらわしている。ここで、氾濫原の堆積物は初成的には水平に堆積するため、これらの南に傾いた地層は断層活動によって生じた傾斜を示している。さらに

Horizon 4の傾斜はHorizon 2および3の傾斜に比べて有意に大きく、Horizon 4の直上には約1,800年前の地層が分布していることから、朝見川断層の活動は約1,800年前以降に少なくとも2回生じたと考えられる。次に、朝見川断層の相対上昇側の山地には主に中期更新世の火山噴出物の分布が報告されている（星住ほか，1988；吉岡ほか，1997）。ただし、本探査測線での朝見川断層の相対上昇側にあたる距離約65 m～測線南端は、山地南縁に設置された坂路であり、盛土や崖錐が存在している可能性が高い。この場合、測線南部の地層は、乱れた、あるいは、複雑な形状を呈する。Unit A～Cでそれぞれ傾斜が極端に異なっているという特徴は、これを反映していると考えられる。

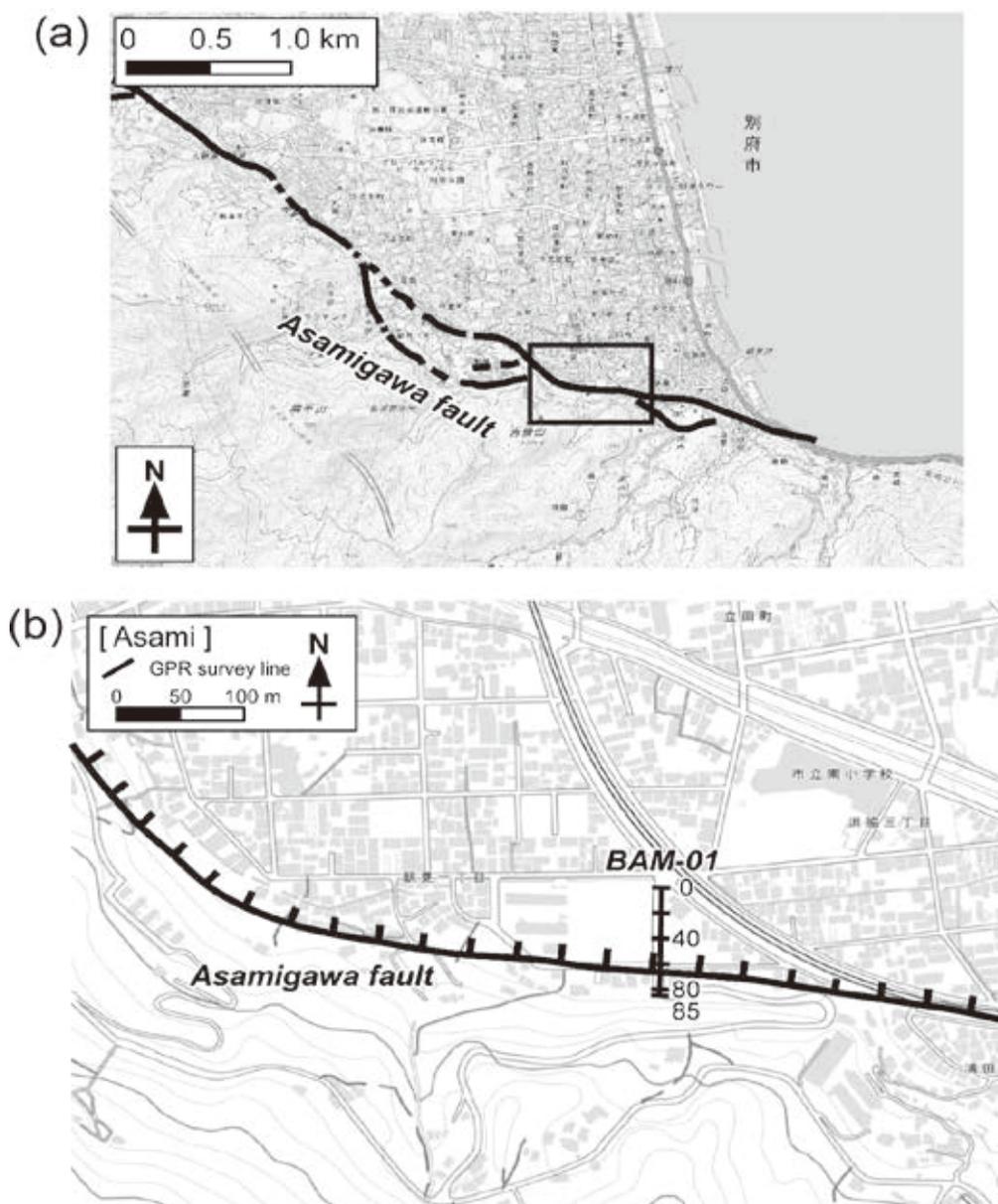


図2 地下レーダー探査測線の位置

(a) 朝見川断層の分布。中央の枠は(b)の範囲を示す。(b) 朝見地点の探査測線図。測線横の数字は測線北端からの距離 (m) を示す。断層位置は(a) (b)ともに、文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017) に基づく。

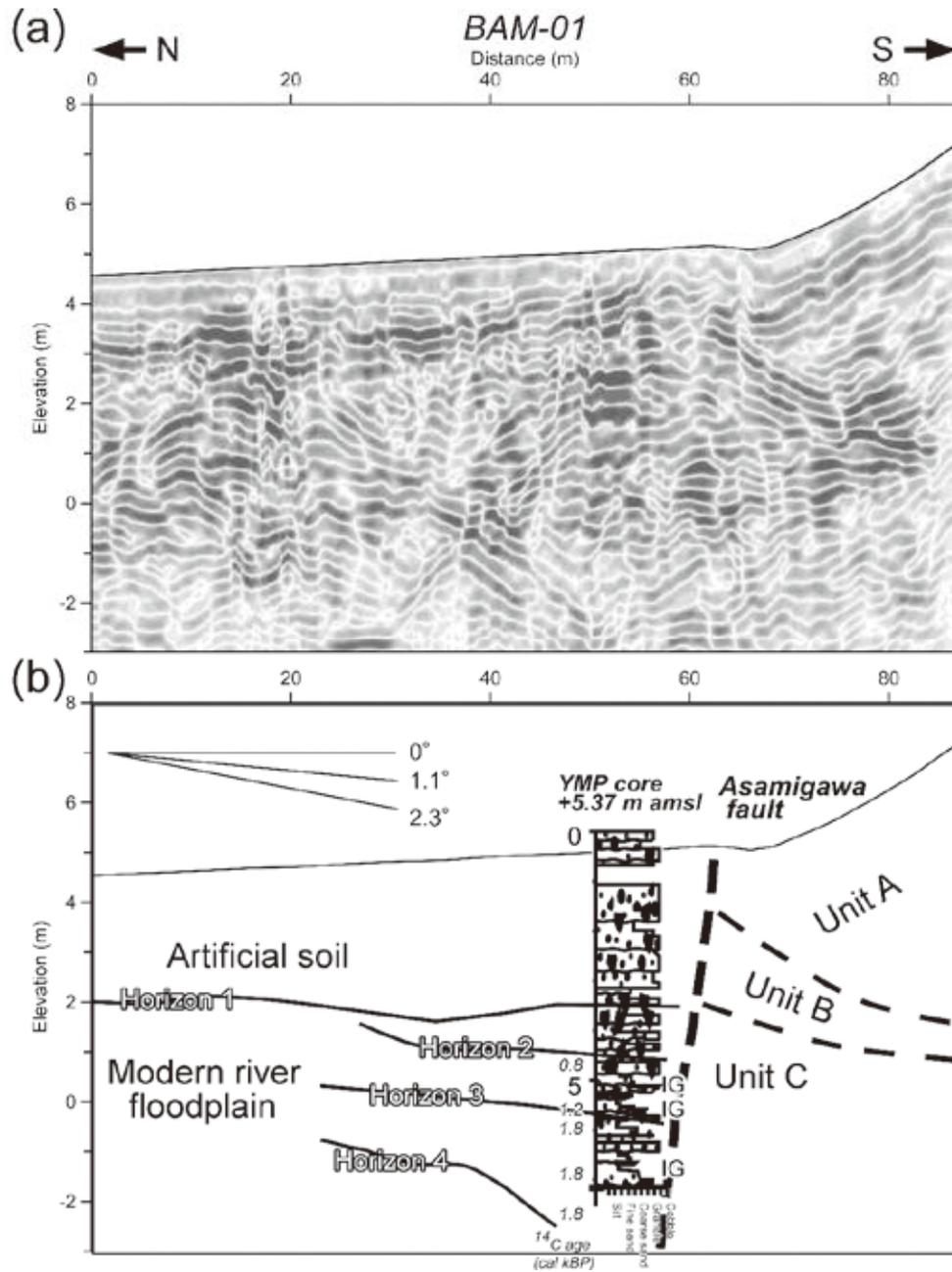


図3 朝見川断層朝見地点における地下レーダー探査の結果

(a)マイグレーション処理を施した深度変換断面図。深度方向に5倍強調。(b)探査断面の主な特徴および地質学的解釈。図中のボーリング柱状図は測線近傍で掘削された調査結果である。Kimura *et al.* (2019)を改変。

別府扇状地でのボーリング調査の概要

別府扇状地南東端にあたる別府市浜脇地区の埋立地の HMP コアから約 900 m 西方の朝見川の上流側の YMP コアまでの合計 4 地点でボーリングコアを掘削して、岩相、岩相境界の特徴、堆積構造、粒度、構成粒子の支持様式、含有物、色調、珪藻化石群集組成が検討された (図 4 ; 中西ほか, 2015, Kimura *et al.*, 2019)。それらの結果、表層のレンガ片やプラスチック片等を含む人工盛土と HBP コアの深度 20.00~18.68m の乙原溶岩^{おとぼろ}の間に分布する沖積層を、下位から網状河川堆積物、蛇行河川堆積物、エスチュアリー堆積物、塩性湿地~浅海底堆積物、現世河川~砂丘堆積物に区分した (図 5)。これらの堆積物から採取した植物片合計 37 試料から得られた加速器質量分析法による放射性炭素年代測定値および K-Ah の降下層準を基にして、堆積物の形成年代が推定された。これらのデータを基にして朝見川断層の沈降側に分布する沖積層の堆積環境の変遷について以下に概説する。なお、放射性炭素年代測定値は暦年較正した 1950 年から何千年前なのかを示す cal kBP を使用する。

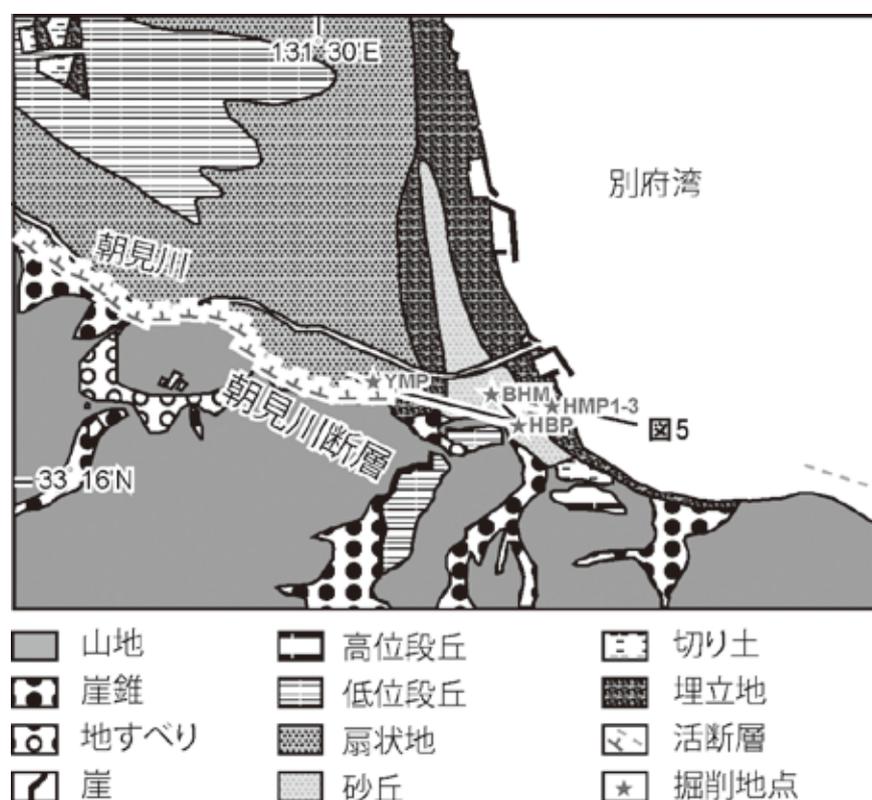


図 4 別府扇状地の地形分類と活断層。地形分類は国土地理院 (2011)、活断層の分布は千田ほか (2001) および岡田ほか (2001) による。

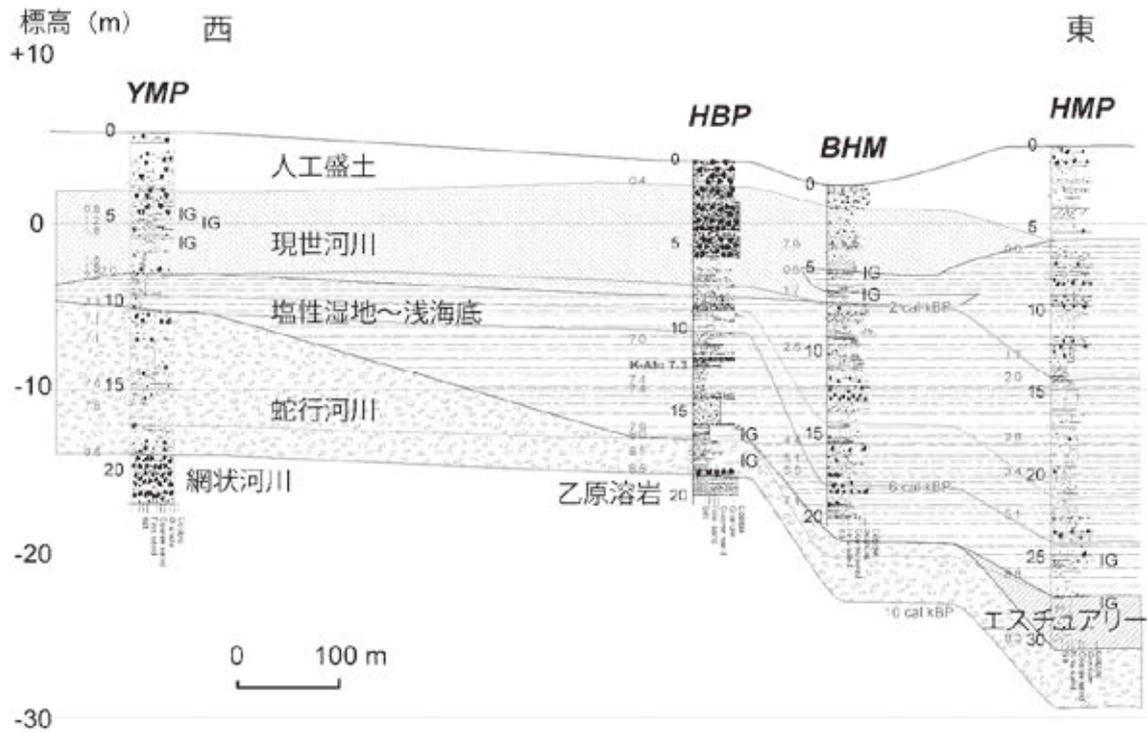


図5 朝見川断層の沈降側の地質断面図。IG は逆級化構造。

・网状河川堆積物

礫質支持層と基質支持の砂礫層の互層からなり、YMP コアの深度 22.00～19.12m のみで観察される。放射性炭素年代測定が可能な試料が得られなかったが、後述する上位の堆積物に 8.6cal kBP の年代値を示す植物片が含まれるので、最終氷期最盛期頃に网状河川流路で形成された沖積層基底礫層（井関，1975）であると考えられる。

・蛇行河川堆積物

植物片、根、有機質泥層を含む砂泥互層および若干の礫層からなり、YMP コアの深度 19.12～10.51m および HBP コアの深度 18.68～15.90m で構成される。*Fragilaria* spp.、*Cocconeis placentula* var. *lineata* (Ehr.) Cleve、*Pinnularia borealis* Ehrenberg、*Planothidium lanceolatum* (Breb. ex Kuetz.) Lange-Bertalot、*Navicula confervacea* (Kuetz.) Grunow などの淡水生の珪藻化石が確認された。HBP コアでは三条の小断層によって砂泥互層が変位している構造が認められた。8.6～7.1 cal kBP の年代値を示す植物片が 7 試料含まれ、HBP コアでは 7.3 cal kBP の K-Ah の特徴を示すガラスの濃集層が放射性炭素年代値と整合的に挟在する。したがって、完新世前期の海水準上昇によって形成された氾濫原から河川流路にかけての蛇行河川堆積物であると考えられる。

・エスチュアリー堆積物

生物擾乱痕や根を含む泥層を主体として若干の砂層と礫層を挟在する、HMP コアの深度 30.00～27.60m のみでみられる。*Fallacia tenera* (Hust.) D.G. Mann、*Bacillaria paradoxa* Gmelin、*Nitzschia levidensis* var. *victoriae* (Grun.) Chohnoky などの汽水生～淡水生の珪藻化石が確認された。8.3 cal kBP の年代値を示す植物片が含まれるので、

完新世前期の海水準上昇に伴って形成されたエスチュアリー堆積物であると考えられる。

・塩性湿地～浅海底堆積物

コンクリーション、生物擾乱痕、巣穴を含む泥層を主体として若干の砂層と礫層を挟在する、YMP コアの深度 10.51～8.33m および HBP コアの深 20.00～3.20m、HMP コアの深度 27.60～5.70m で構成される。ボーリングコアの半裁面は時間が経過すると硫化物が析出して、土色が黄～褐色を帯びる。*Paralia sulcata* (Ehr.) Cleve、*Grammatophora* spp.、*Odontella aurita* (Lyngb.) C. Agargh、*Thalassionema nitzschioides* (Grun.) Grunow などの海水生の珪藻化石が確認された。8.0～0.6 cal kBP の年代値を示す植物片が 18 試料含まれるので、完新世の海水準安定期に形成された塩性湿地～浅海底堆積物であると考えられる。

・現世河川～砂丘堆積物

植物片、根、逆級化構造（増田・伊勢屋，1985）を含む砂泥互層および若干の礫層からなり、YMP コアの深度 8.33～3.65m および HBP コアの深度 5.91～1.59m、BHM コアの深度 7.00～1.50m で構成される。*Achnanthes exigua* Grunow、*Pseudostaurosira brevistriata* (Grun.) Williams & Round、*Nitzschia frustulum* (Kuetz.) Grunow などの淡水生の珪藻化石が確認された。BHM コアの深度 5m 付近では海生～汽水生の珪藻化石が 20～10%程度増加する層準が認められる。7.9～0.4 cal kBP の年代値を示す植物片 11 試料含まれるが、7.9 cal kBP の年代値は下位の 0.6 や 1.7 cal kBP よりも著しく古い値を示す。したがって、7.9 cal kBP を示した木片は再堆積によって混入したものであると考えられる。そのため、それを除外した 2.2～0.4 cal kBP ので、完新世後期のデルタの前進によって形成された現世河川～砂丘堆積物であると考えられる。

まとめ

別府扇状地域の南縁を画する朝見川断層に関して、これまでの研究の概要を紹介するとともに、特に断層沿いの浅層部（沖積層を主とする）の構造に関して、断層低下側における、地下レーダー探査および断層沿いのボーリングによる地下堆積物調査の結果をまとめた。朝見川断層は北落ちの正断層として記述され、最近の研究ではA級（1000年あたり1mをこえる変位）の活断層として認識され、地震防災上の関心が高いとともに別府温泉の地下流動系にも影響がある断層である。断層の低下側（北側）の断層活動に伴って形成されたと推定される海進の堆積物を含む地下地質浅層部分の構造を明らかにする手法として、地下レーダー探査とともにボーリングによる堆積物調査が有効であると考えられる。

なお、今回報告データの一部は、文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科「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」により得られた。

文献

- 物理探査学会 編 (2016) 物理探査ハンドブック 増補改訂版. 物理探査学会, 1045p.
- 千田 昇・松山尚典・下山正一・松田時彦・三島久尚 (2001) 別府地溝帯・別府湾地溝を構成する亀川断層の最近の活動履歴. 活断層研究, 20 号, 92-103.
- 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, 194 (6), 895-898.
- 千田 昇・池田安隆・中田 高・岡田篤正・宇根 寛 (2000) 1:25,000 都市圏活断層図「別府」. 国土地理院技術資料, D1-No. 375.
- Daniels, D. J. ed. (1996) *Surface-penetrating radar*. The Institute of Electrical Engineers, 300p.
- Gross, R., Gree, A.G., and Horstmeyer, H. (2004) Location and geometry of the Wellington Fault (New Zealand) defined by detailed three-dimensional georadar data. *Journal of Geophysical Research*, 109, B05401, 14p.
- 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, 131p. 地質調査所.
- 池田安隆 (1979) 大分県中部火山地域の活断層系. 地理学評論, 52, 10-29.
- 井関弘太郎 (1975) 沖積層基底礫層について. 地学雑誌, 84 (5), 247-264.
- Itoh, Y., Takemura, K. Kamata, H. (1998) History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics* 284, 135-150.
- 地震調査研究推進本部 (2005) 別府一万年山断層帯の長期評価.
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_beppu/index.htm.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017) 四国地域の活断層の長期評価 (第一報)
- 木村治夫・谷口 薫 (2015) 2014 年長野県北部の地震 ($M_w=6.2$) の地表地震断層における地中レーダ探査 一糸魚川-静岡構造線活断層系神城断層北部の極浅部断層形状一. 活断層研究, 43, 119-132.
- Kimura, H., Nakanishi, T., Katsuki, K., Hong, W., Matsuyama, H., 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.
- 国土地理院 (2011) 土地条件調査解説書「大分地区」. 20p.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺]. 東京大学出版会, 336pp.
- 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堆積物の示相堆積構造. 堆積学研究会報特集号, 108-116.
- 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017) 「別府一万年山断層帯 (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.

- Nakanishi, T., Takemura, K., Matsuyama, H., Katsuki, K., Hong, W., Kimura, H., Horikawa, Y. (2016) Holocene activity of the Asamigawa fault detected from sediment cores and ground penetrating radar cross-sections in Beppu city, western Japan. *The 13th East Eurasia International Workshop Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia*, 60-62.
- 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.
- 中西利典・木村治夫・松山尚典・ホン ワン・堀川義之・越後智雄・北田奈緒子・竹村恵二 (2019) 群列ボーリング調査と地中レーダ探査による伏在活断層の活動履歴の検討—大分平野西部の府内断層の例—. *第四紀研究*, 58, 163-173.
- Neal, A. (2004) Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66, 261-330.
- 大分県 (1999) 別府—万年山断層帯 (トレンチ・ボーリング調査編) に関する調査成果報告書. <https://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Oita6Cfrm.htm>
- 大分県 (2021) 朝見川断層と温泉. 大分県の天然記念物 (地質鉱物): 天然記念物緊急調査 (地質鉱物) 報告書増補改訂版 (204 p), 92-93.
- 岡田篤正・池田安隆・中田 高・千田 昇・宇根 寛 (2000) 1:25,000 都市圏活断層図「大分」, 国土地理院.
- 首藤次男・日高 稔 (1971) 大分地方の沖積層, とくに別府湾の起源について. *九大理研報(地質)*, 11, 87-104.
- 鈴木政達 (1937) 別府附近の地史と温泉脈. *地球物理*, 1 (1), 6-19.
- 竹村恵二 (2020) 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—. 大分県温泉調査研究会報告, 71号, 19-27.
- 竹村恵二 (2021) 別府地域および周辺の地下構造 (2) —別府扇状地の物理探査の例—. 大分県温泉調査研究会報告, 72号, 17-22.
- 竹村恵二・檀原 徹 (1993) 由布川火砕流のフィッシュン・トラック年代. *火山*, 38, 63-66.
- 竹村恵二・由佐悠紀・北岡豪一 (1993) 大分平野と別府湾 (深部). *地質学論集*, 41, 35-42.
- 吉岡敏和・星住英夫・宮崎一博 (1997) 大分地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 65p.

由布院の噴気地球化学調査

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

由布院に見られる噴気の地球化学的研究について文献調査を行い、ガス組成や各種ガス成分の同位体組成についてのデータを収集した。1980年代の情報であるが、得られたデータを用いていくつかの地化学解析を行ったところ、別府地域の噴気地や地獄に噴出する噴気と同様に、ヘリウム(He)や二酸化炭素(CO₂)の同位体組成にマントルなど地球深部に由来する情報が記録されていることがわかった。また、噴気のもとになっている地下の熱水の温度は200°C~250°Cと別府地域の250°C~300°Cより低めであることが示された。

1. はじめに

由布院温泉は、由布院盆地の中央部にかつて存在した自然湧出温泉を中心に発展した温泉地を指し、由布市のそのほかの温泉地の「湯平温泉」、「塚原温泉」、「庄内温泉」、「挟間温泉」を含めて湯布院温泉郷と称されることがある(環境省, 2019)。山下(1975)によれば、由布院温泉の泉質はほとんどが中性から弱アルカリ性の単純温泉であるが、石松と佐土原の両地区には弱食塩型泉質の沸騰泉が存在する。由布院温泉の温泉科学的研究は、著者の知る限り、由佐(1983)を最後に40年近く行われておらず、由布院温泉の現状に関する詳しい情報、特に本研究の主題である噴気に関わる沸騰泉の情報を文献から得ることは容易でない。しかし、2021年現在でも遠目に噴気が見られることや最近の温泉分析書から、沸騰泉は依然として存在することがうかがわれる。

著者らは、活火山である由布岳の南西麓から由布院盆地に展開する由布院温泉の噴気の地球化学的な調査研究を通して、温泉の熱源となる地下の地熱流体の情報(起源や物理的状态など)を入手する計画を立て、大分県温泉調査研究会の事業として申請した。しかし、令和2年の春頃から世界的に流行を始めた新型コロナウイルス感染症の日本国内への感染拡大のあおりを受け、なかなか現地調査に出かけることができず、計画を変更して既存データを活用した予備研究(pilot study)を行うことにした。十分なデータではなかったが、この20年ほどで噴気の地球化学的解析手法が整備されていたこともあり、既存データにそれらを適用することで有意義な情報を手に入れることができた。本報文では、その成果を報告する。

2. 調査研究の方法

由布院温泉に関係する噴気が目視されるエリアを図1に示す。そのエリア(佐土原地区と石松地区)については現地に赴き、沸騰泉からの噴気であることを確認した(2021年12月22日)。佐土原地区には薬師堂温泉(インターネット情報などからこれが「由布岳地獄」であると

思われたので図1にはその様に記載)のほか少なくとも5か所の泉源があり、すべて自噴状態にあった。一方、石松地区で確認できた2つの沸騰泉源はどちらもエアリフト泉であった。

これまで著者が用いてきた解析方法(例えば、大沢, 2000;大沢ほか, 2015)に使用できそうなデータが掲載されている文献調査を行ったところ、幸い、新エネルギー・産業技術総合開発機構[NEDO]が全国地熱資源総合調査の中で実施した広域熱水流動系調査の鶴見岳地域の報告書(NEDO, 1989)に本エリアの沸騰泉噴気の地球化学データが掲載されていたので、1980年代の古い情報であるが、それらを利用することにした。また、由布岳の南西麓に位置する佐土原地区の噴気との比較検討を考えて、鶴見火山(鶴見岳-伽藍岳)に分布する自然噴気(分布エリアを図1に記入)の既存の地球化学データも引用した(Sturchio et al., 1995;由佐ほか, 1995;大沢ほか, 1998;大沢, 2000;大沢ほか, 2015)。

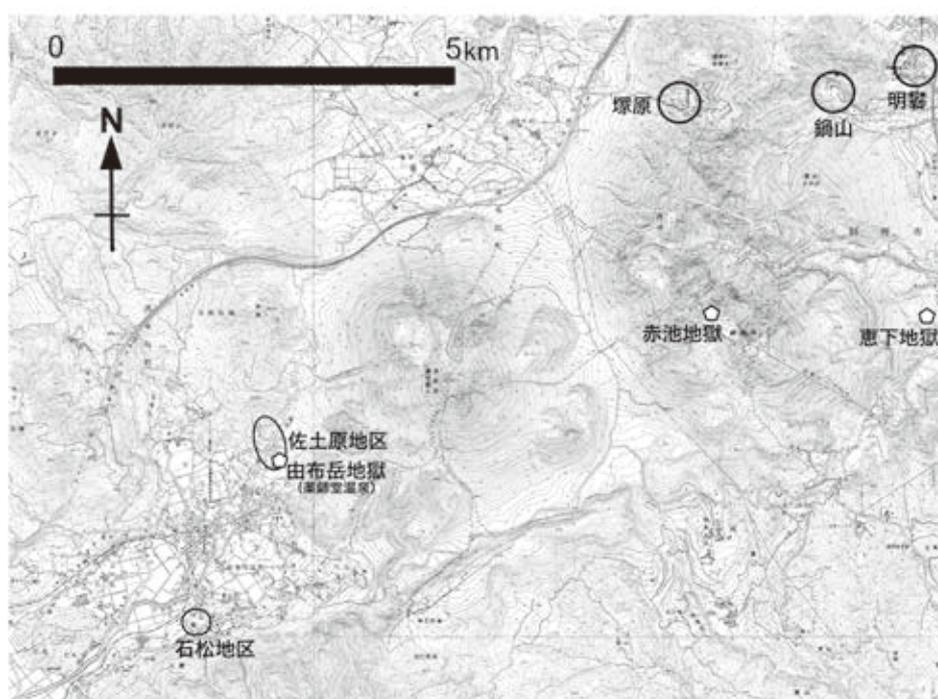


図 1 本研究で対象とした噴気の存在位置

3. 結果と考察

3-1. ヘリウム(He)の起源

入手した由布院温泉の噴気の希ガス同位体データ(^3He , ^4He , ^{20}Ne)を、既存の別府温泉の自然噴気データとともに、「ヘリウム同位体ダイアグラム($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 vs $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比の関係図)」上に表した(図2)。別府の噴気データがプロットされるマンテール-大気混合線上に由布院温泉の噴気データもおおむね乗っており、由布院の噴気に含まれる微量の He にはマンテールに由来する He が含まれ、由布院温泉が別府温泉と同じように活火山に隣接することから、その実態はマグマ起源の He であると思われる。

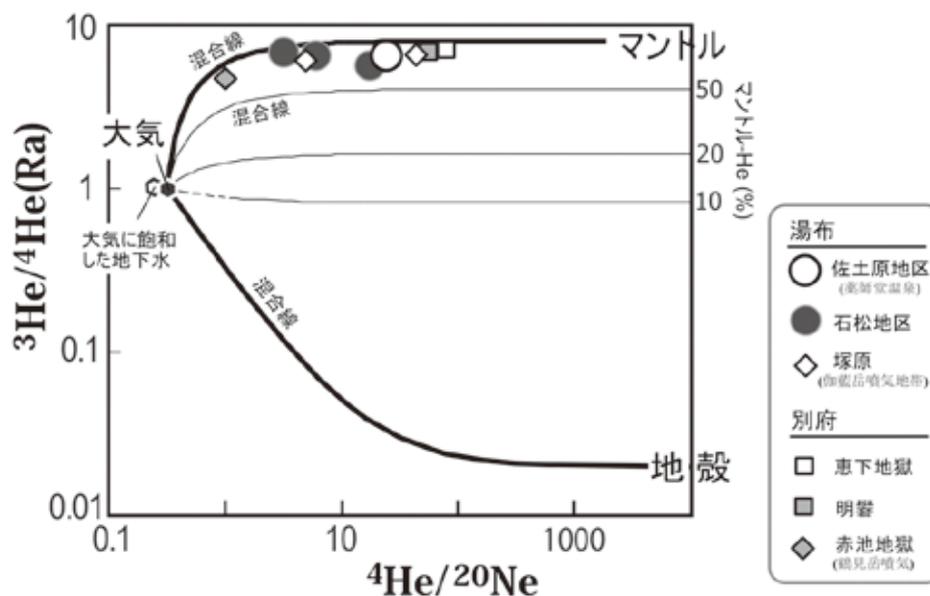


図 2 噴気のヘリウム同位体ダイアグラム($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 vs. $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比の関係)

3-2. 二酸化炭素(CO_2)の起源

由布院の噴気に主要なガス成分として含まれる CO_2 の起源を知るために、既存の別府温泉の噴気のデータとともに CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 対 $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 比による起源判定図上 (Sano and Marty, 1995) にプロットした (図3). 由布院の噴気のデータはおおむね別府温泉の噴気のそれと同様な位置にプロットされていることから、由布院の噴気 CO_2 も、海洋プレートの沈み込み運動によりマントル内に持ち込まれた海成炭酸塩 (CaCO_3) に由来し、沈み込み帯マグマの発生を経たのち、火山地熱活動を通して再び地表に噴出しているものであるとみることができる.

3-3. 噴気のもとにある地熱流体の性状

図4は、噴気のガス成分の H_2/Ar 比と CO_2/Ar 比の関係から地下に潜在する地熱流体の性状を推定するダイアグラムである (例えば, Giggenbach and Goguel, 1989; 大沢, 2000). このダイアグラムは、地表に噴出する噴気が熱水に溶存していたものか (熱水平衡), あるいは、もとから蒸気として存在していた地熱流体であるのか (蒸気平衡), 熱水と蒸気が共存する気液二相状態であったのかといったことを推測したり、地下での温度の推定や化学平衡の不完全性を評価するために考案された解析法である. 図にプロットされた由布院温泉の噴気のデータは、「熱水平衡」の線に沿うようにやや下側にプロットされていることから地表に上昇する過程で冷却を受けた可能性があるが (Giggenbach and Goguel, 1989), 石松地区の噴気は 200°C 前後の熱水、佐土原地区の噴気は 250°C 程度の熱水から沸騰により分離した蒸気であることを示している. 図4の「熱水平衡」線と「蒸気平衡」線に挟まれた範囲にプロットされているわずかなデータ (これらは噴気として放出される直前に気液二相状態にあった可能性がある) を除

くと、塚原温泉や別府温泉の噴気も、由布院温泉の噴気と同様に、熱水から沸騰により分離した蒸気であることを示しているが(大沢, 2000; 大沢ほか, 2015), 平衡温度は 250°Cを超えており(図4中で 250°C~300°Cくらいを示していることに注目), この点において由布院と別府・塚原は異なることが分かった。

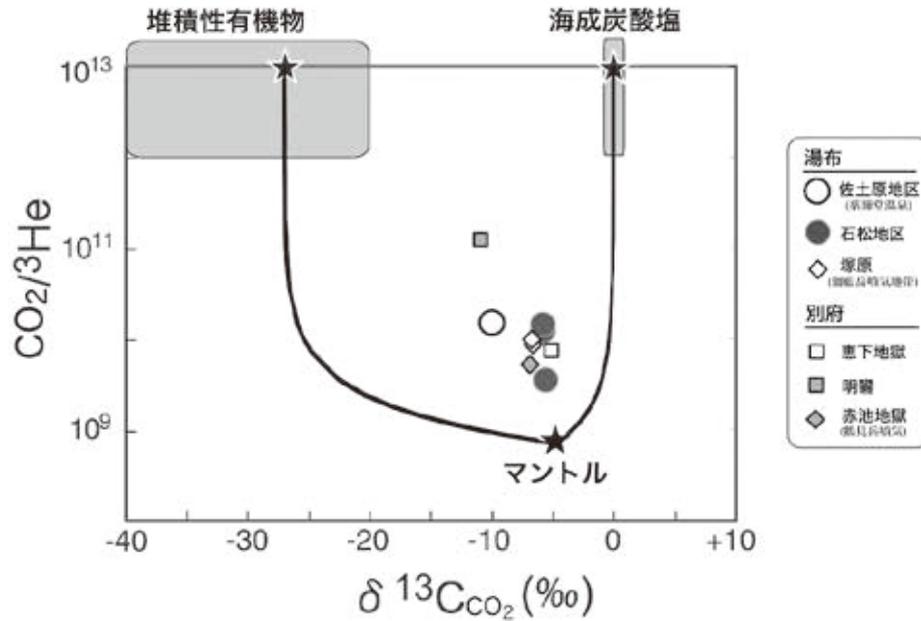


図 3 噴気の CO₂ の δ¹³C 対 CO₂/³He 比の関係

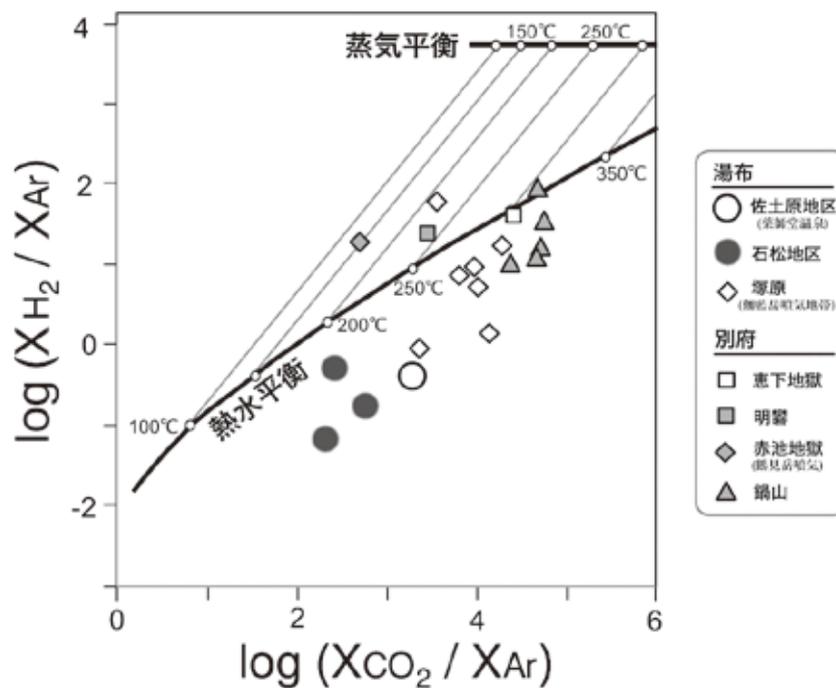


図 4 噴気の CO₂/Ar 比対 H₂/Ar 比の関係図

4. おわりに

文献だけからの調査研究であったが、収集されたデータ(噴気の高ス組成、高ス成分の同位体組成)の地化学解析から、由布院温泉の地下には 200°Cにも達する熱水(佐土原地区はやや高く 250°C程度と推定)が存在することが示された。由布火山・鶴見火山を間に挟んで隣接する別府温泉と同様に、火山の地下に潜在するマグマから発散される高温の熱水流体が直接の熱源になっているものと思われるが、由布院温泉を形成している熱水系が、Sturchio ら(1995)が考えたように、別府温泉の熱水系につながっているかどうかは現段階では不明確である。しかし、例えば、由布火山と鶴見火山のマグマ溜りが同じものであり、そこから発した高温熱水流体が由布岳や鶴見岳-伽藍岳の地下にそれぞれ熱水系を生成させていて、それらが由布院温泉、塚原温泉や別府温泉を形成させていると考えることも不可能ではない。そのような大きな火山地熱系の中で別府温泉の熱水系の一部が由布院温泉の形成に参与していると考えて研究データを取得することは、火山防災的見地からも意義があると思われる。このような仮説を検証するためにも、由布院温泉の噴気や沸騰泉の研究は今後も続けていく必要があり、当初予定した現地調査にもとづく地球化学的研究を進めていきたいと思っている。その研究過程で、現在の由布院温泉の地下の深部熱水の温度が、1980年代と比べて同程度なのか異なるのかも明確にしたいと考えている。

謝辞

本研究は、引用文献データの解析にもとづき、解析作業から報告書執筆まで著者ひとりで行ったために単著としたが、由布院温泉の沸騰泉の現地確認には京都大学地球熱学研究施設技術専門職員の三島壯智氏が同行した。ここ記して、感謝申し上げる。

引用文献

- Giggenbach, W.F. and Goguel, R.L.(1989) Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Fourth Edition. Report CD2401, Chemistry Division, DSIR, 81p., New Zealand.
- 環境省(2019)湯布院温泉郷(由布院温泉, 湯平温泉, 塚原温泉, 庄内温泉, 挟間温泉)国民保養温泉地計画, 令和元年 10 月, 61p.
- 大沢信二, 大上和敏, 由佐悠紀(1998)伽藍岳の地熱調査(4)―噴気ガスの地球化学―. 大分県温泉調査研究会報告, **49**, 5-10.
- 大沢信二(2000)噴気ガスの化学・同位体組成からみた別府温泉の地熱流体の起源及び性状. 大分県温泉調査研究会報告, **51**, 19-28.
- 大沢信二, 三島壯智, 酒井拓哉(2015)別府・恵下地獄の地球科学的調査. 大分県温泉調査研究会報告, **66**, 17-27.
- Sano, Y. and Marty, B.(1995)Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. Chemical Geology, **119**, 265-274.

新エネルギー・産業技術総合開発機構[NEDO](1989)昭和63年度全国地熱資源総合調査
(3次)広域熱水流動系調査 鶴見岳地域 報告書 要旨, 342p.

Sturchio, N.C., Ohsawa, S., Sano, Y., Arehart, G., Kitaoka, K., Yusa, Y. (1995) Outflow Plume
of the Beppu Hydrothermal System at Yufuin, Japan. *Geothermics*, 25, 215-230.

山下幸三郎(1975)シンポジウム“湯布院温泉”(3)大分県湯布院町の温泉概況. *温泉科学*,
26, 85-95.

由佐悠紀(1983)由布院温泉の化学成分長期変化. *大分県温泉調査研究会報告*, **34**, 18-29.

由佐悠紀, 大沢信二, 北岡豪一, 竹村恵二, 福田洋一(1995)伽藍岳の地熱調査. *大分県温
泉調査研究会報告*, **46**, 13-20.

由布岳・鶴見岳の地球化学的研究 3

広島大学地球惑星システム学専攻

柴田知之・岡田郁生

1. はじめに

沈み込み帯のマグマ活動の理解は、島弧マグマや大陸地殻の発生・進化過程を解明する上で重要である。沈み込み帯では玄武岩質から流紋岩質の多様なマグマ活動が見られるが、その中でも安山岩マグマが卓越する。従って、安山岩マグマの成因を明らかにすることは沈み込み帯のマグマ活動を理解する上で必要不可欠である。しかしながら、安山岩マグマはマグマ混合や地殻物質の同化などの複雑なプロセスによって生成されると考えられており、これら複雑なプロセスによって、ある時点でのマグマの物理化学的特徴は次のマグマプロセスによって上書きされ変化する。この変化の蓄積が安山岩マグマの生成過程を詳細に観察することを困難にさせ、それ故、安山岩マグマの成因は未だ不明な点が多い。本研究では、晶出したときのマグマ（正確には、マグマの液体部分であるメルト）の物理化学的特徴を保持している、火山噴出物中の斑晶鉱物の主要元素・微量元素組成を解析し、安山岩マグマの生成過程をより詳細に観察する方法を探ることを目的とする。本研究は、九州北東部に位置する第四紀由布火山の安山岩中の角閃石を対象とし、それらの主要元素組成を電子線マイクロアナライザーで、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計（LA-ICP-MS）で分析した。

2. 結果と考察

由布火山の安山岩中の角閃石は、主要元素組成から Si に乏しいものと Si に富むものの 2 つのグループに分けられた。近年、高温高压実験の結果の多変量解析に基づいて、角閃石単相の主要元素組成から、晶出温度圧力条件および平衡共存メルトの主要元素組

成, さらには, 角閃石 - メルト間の微量元素の分配係数を推定する方法 (Ridolfi and Renzulli 2012; Putirka 2016; Zhang et al., 2017; Shimizu et al., 2017; Humpherys et al., 2019) が提案されている. 本研究はこれらの研究を統合し, 由布火山の安山岩中の角閃石の晶出圧力温度条件, 平衡共存メルトの主要元素組成, 角閃石 - メルト間の微量元素の分配係数を推定した. さらに, 推定した角閃石 - メルト間の分配係数を角閃石の微量元素組成の分析結果に適用することで, 平衡共存メルトの微量元素組成も推定した. 推定結果から, 2つのグループはそれぞれ, 異なる物理化学的特徴を持つメルトから晶出したことが示された. さらに, 推定した温度圧力条件およびメルト組成の解析や全岩組成などとの比較から, 安山岩マグマは, Si に富む角閃石が晶出した珪長質マグマ (深度 3-8 km), Si に乏しい角閃石が晶出した苦鉄質マグマ (深度 13-25 km), 玄武岩質マグマ (深度 34 km) の混合によって生成されたと考えられる. 本研究では, 角閃石の主要元素・微量元素組成を用いて, 安山岩マグマの生成過程のある時点でのメルトの温度, 圧力, 主要元素組成, 微量元素組成を系統的にかつ定量的に推定できることを示した.

マグマは, 鉱物とメルトの混合物である. この視点に基づいて, 推定したメルト組成と由布火山の安山岩の主要な造岩鉱物である斜長石および角閃石の化学組成を結ぶ混合線から, 2つのグループの角閃石が晶出したマグマ (苦鉄質端成分と珪長質端成分) の取り得る組成を制約した. さらに, これらの結果と全岩組成の線形回帰線を組み合わせることで, マグマ混合の苦鉄質端成分 ($\text{SiO}_2 \approx 45 \text{ wt.}\%$) と珪長質端成分 ($\text{SiO}_2 \approx 69 \text{ wt.}\%$) の化学組成を直接的に決定した. 本研究はマグマ混合の端成分マグマの化学組成を直接的に決定することに初めて成功したものである. さらに, この手法が発展すれば, これまで困難であった, マグマ混合の端成分マグマの起源や進化過程とともに, 安山岩マグマが生成していく過程を議論することが可能となり, 沈み込み帯のマグマ活動の理解が大きく進むと期待される.

温泉地の観光地化に於いて大阪商船が果たした役割 ～別府温泉ならびに紀伊半島を事例とて～

別府大学

中山 昭 則

要 旨

明治以降近代鉄道の開通は地域に大きなインパクトを与え、これまで湯治場としての機能が主体であった各地の温泉場はより広域からの集客が可能となった。その一方、明治新政府は江戸期から基盤のある船舶と航路の近代化と整備を急いだ。大阪商船もこれに呼応する形で設立され、大阪を拠点として瀬戸内航路および紀州航路の整備を進めた。

紀州航路は南紀白浜温泉を南紀観光の拠点として観光開発に積極的に関与した。しかし、紀伊半島南部にも鉄道開業の波が押し寄せたため鉄道との連携を図り旅客の利便性を高めたが、地形的制約も相まって廃航の道を辿った。

一方、瀬戸内航路は山陽鉄道という競合相手が出現したが、四国地方の鉄道整備が遅れたことや鉄道の優位性が発揮できない遠隔地の別府温泉を目指したため、今日まで航路は存続している。

このように廃航と存続という対照的な結果を生みながらも、大阪商船は温泉地の観光地化に大きな役割を果たしたと言えよう

1 はじめに

大阪商船(現(株)フェリーさんふらわあ)は¹⁾ 1884(明治17)年5月1日「有限会社大阪商船会社」として設立された。その背景には国内海運業界、特に大阪を中心とした地域では小規模海運会社の乱立状況があった。すなわち過当競争および旅客・流通の不合理性が近代化の妨げとなっていると指摘されていた。いわばこれら小規模海運会社を連合・合同させる意味合いが強かったといえよう。詳細は後述するが、このような背景で船出した大阪商船であったが、設立当初は苦難の連続であった。

こうした中においても大阪商船は積極的な航路の整備と開発を続け、とりわけ瀬戸内航路と南紀航路は地域経済に与えた影響は決して小さくはない。南紀白浜温泉を中心とした南紀航路については既に考察した処である²⁾。南紀航路は鉄道開業とともにその役割は変化を余儀なくされ、鉄道輸送の補完的機能へと後退しやがて航路廃止の道をたどった。

とはいえ、白浜温泉の開発と発展に多大な貢献と影響を及ぼしたことは間違いないことである³⁾。大阪商船は白浜温泉に鉄道が到達したのちはその補完機能を務めながら、さらに熊野地方へと開発の触手を伸ばしていったのである。こうして紀伊半島南部の観光開発に大きな足跡を残していった。

一方、瀬戸内航路は前述した小規模海運会社の競争が激しかった海域であったため、大阪商船がこれらを連合して発足したとはいえ、当初は船主などの利権が対立し、その意向に沿って運航した航路も多かったため経営的にもかなり苦戦していた。やがてこのような苦しい状況を乗り越え瀬戸内航路の整備が進み、別府温泉を始め沿岸地域の観光開発に一石を投じたのである。

本研究は大阪商船が数々の困難を乗り越えて地域観光に果たした役割について、別府温泉を中心とする瀬戸内エリアと南紀エリアを事例として検討する。

2 大阪商船の設立経緯

(1) 零細船主の乱立とその同盟化

大阪商船の設立は1884(明治17)年5月1日のことであるが、その設立の経緯を述べるためには幕末までさかのぼる必要がある。江戸幕府は鎖国令によって海外渡航が可能な大型船の建造を厳しく取り締まったが、1843(天保8)年のアメリカ・モリソン号が相模の国(現神奈川県)の浦賀侵入事件以降、外国船が度々我が国沿岸に顔を見せるようになった。幕府は外国船の近代装備に刺激を受けて1853(嘉永6)年には大型船建造禁止令を解いた。さらに各藩に対して大型船建造を奨励するに至った。

明治新政府は「海運は今後の国運を左右する」として外国人からの西洋式船舶の購入ならびに西洋式船舶の建造を奨励し、その範囲を町人百姓(マ)にまで広め、その所有を許可した⁴⁾。その結果、大阪府では広島藩、熊本藩をはじめとする8藩と99の民間団体が外国人から船舶を購入し、大阪と各藩あるいは大阪と神戸間、大阪と東京間の航路を開いた⁵⁾。

その後廃藩置県により旧藩直営の船舶は払い下げられることになり、海運業は民間人が主役を担うことになった。例えば、土佐藩出身の岩崎弥太郎は藩船を購入して三菱商会を立ち上げたのである⁶⁾。

1874(明治7)年には大阪・神戸間に鉄道が開通した。同区間を航路で結んでいた海運各社は航路廃止を余儀なくされ、余った船舶は他の航路に振り分けられていった。この中に酒田丸(後の大分丸)、金刀比羅丸、白水丸も含まれ、後に大阪と大分県を結ぶ航路に姿を現したのである⁷⁾。その結果、瀬戸内航路は零細な船主による乱立状態となっていたのである。

(2) 同盟から会社設立へ

1877(明治10)年に勃発した西南戦争により大阪は物資輸送の拠点となり、瀬戸内航路を中心とする海運業は大きく発展した。戦後も活況を呈して瀬戸内航路は黄金期を迎えたのであった。

しかし、海運業者の大半は所有船舶1隻という零細事業者であり、過当競争による運賃値下げ競争が激化し海運業の発展に支障をきたすとの懸念の声が高まった。大阪府は規制に乗り出し運賃の統一を試みたが、これを遵守する船主は少なかったという。さらに大阪府は関係する13県とともに規制に乗り出したが、これも失敗に終わった⁸⁾。

その上、西南戦争は明治新政府にとって大きな財政負担となり、財政立て直しを図るため支出削減と増税を強行し日本経済はデフレに陥った。いわゆる松方財政と言われるものである。この不況は零細海運業者を苦境に追いやり「大阪経済は零細海運業者の行く末に掛かっている」との懸念が広まった。こうして零細海運会社が連合する会社設立の機運が高まったのであった。

船主たちは同盟を結んで運賃の統一化を図るなどの策を取ったが、所詮零細規模の船主が大半を占めていたので資金難に陥るケースが多く、日々の利益を追求する構図は変えることはできなかったため、同盟は有名無実の状態に近かったという⁹⁾。

1882(明治15)年11月、大阪財界を代表する廣瀬宰平(住友家総理代人)らは商船会社設立に努力する誓約書を大阪府知事に提出した。背景には当時海運会社同士の対立が各地で激化し、国家のために看過できないとの危機感があったという¹⁰⁾。同年12月22日、住友吉左衛門をはじめとする17名の有志が発起人となり商船会社設立に向けて動き出した。これが大阪商船設立の第一歩である。

特筆すべきは発起人のメンバーである。山口吉郎兵衛は銀行家、田中市兵衛と金澤仁右衛門は日本綿花と日本紡績設立の発起人を務めるなど大阪で新しいビジネスを展開した実業家である。金澤は大阪商法会議所(現商工会議所)の副頭取も務めた。杉村正太郎は阪神電鉄専務、澁谷庄三郎は日本人として初のビール醸造と販売を手掛けた。このように大阪財界の要人が名を連ねていることから、小規模海運会社が合同して設立される新しい海運会社に寄せる期待の大きさをうかがい知ることが出来よう。また、大阪府知事は提出された請願書を僅か3日後の12月25日付けで認可しており行政側の期待の大きさもうかがい知れる。

3 大阪商船設立と瀬戸内航路・南紀航路の開設

(1) 会社設立とその後の紆余曲折

認可された請願の主な内容は、社名を「大阪商船會社」とすること(第一条)。支店・出張所は大阪以西の寄港地に設立すること(第二条)。會社の創業目的は「荷客輸送」とすること(第三条)。資本金は 150 万円として一株 50 円の株券を 3 万株売り出すこと(第四条)、などを定めたものであった。また、汽船 30 隻以上総額 10 万円以上の株主が確定した時点で開業をすることも定めた。

さらに大阪商船會社は出来るだけ多くの船主の参画を企図したので、その趣意書には会社設立のメリットについて「大阪出入りの汽船は 80 隻に上り旅客・貨物の輸送需要に対して著しい過剰状態にある。この解決には船主たちが団結して一大商船会社を設立し、需給のバランス調整と船舶改良を図る他ない」と強く訴えている。さらに「各船主は 1・2 隻の所有船に依存して危険度も高く、融資を受けるにも貸し付け条件は不利である。そこで株式会社を組織して船価に該当する株式を保有する」とも記している¹¹⁾。

しかしその実態は小規模船主の連合体であり、いわば共存共栄を最優先した形での船出ともいえる。したがって、小型船による航路が多数存在し経営的に合理的な組織とは程遠いものであった。この状況を裏付ける出来事として、農商務省管船局による船舶の評価を巡る対立が挙げられる。船主たちの激しい抵抗により船舶評価作業は中断を余儀なくされ、結果会社設立事務もストップしてしまった。

広瀬幸平らは当時 2 大海運会社であった三菱共同運輸との差別化(すなわち国内航路中心)を表明し、国からの支援の約束を取り付け船主の説得に当たり功を奏した¹²⁾。

こうして紆余曲折を乗り越えて、1884(明治 17)年 5 月 1 日大阪商船は正式に開業の運びとなった。

(2) 開業と航路

開業時の航路は大阪から瀬戸内海沿岸を經由して山陽・山陰地方ならびに九州に至る路線。大阪から四国各地に至る路線。大阪から和歌山に至る路線の 18 本線 4 支線であった(図 1、表 1)。



当初の航路は大阪を起点とする下記 18 本線と 4 支線であった。

西九州航路	第 1 本線 大阪百貫線	第 2 本線 大阪大川線	第 3 本線 大阪長崎線
	第 5 本線 大阪伊万里線	第 6 本線 大阪博多線	
東九州航路	第 4 本線 大阪鹿児島線	第 8 本線 大阪熊本線	第 9 本線 大阪大分
			宇和島線
山陰航路	第 12 本線 大阪馬関線		
四国經由山陽航路	第 7 本線 大阪馬関線	第 10 本線 大阪広島線	第 11 本線 大阪尾道線
山陽航路	第 14 本線 大阪姫越線		
四国航路	第 13 本線 大阪徳島線	第 16 本線 大阪高松線	第 18 本線 大阪高知須
			崎線
大阪湾航路	第 15 本線 大阪洲本線	第 17 本線 大阪和歌山線	
支線航路	第 1 支線 長崎大川線	第 2 支線 馬関広島線	第 3 支線 広島尾道線
	第 4 支線 博多度津線		

図 1. 大阪商船開業時(1884(明治 17)年)の航路図
注)『大阪商船株式会社五十周年史』66 ページ附図転写

表 1. 大阪商船開業時(1884(明治 17)年)の航路表
注)『大阪商船株式会社八十周年史』14 ページ転写

しかし、これら路線は各船主が従来から航行していたものであり、各船主が持ち寄った小型木造船でその多くは明治10年以降に建造されたものであったが、過度の競争に酷使されたたものでかなり痛んでいたという¹³⁾。さらに、大阪・神戸から香川県の多度津に向かう路線は7本線もあり、同一会社の運航でありながら競合するという矛盾を抱えたのである¹⁴⁾。

その上、当初予定していた支社11か所、出張所7か所、そして各港に設置する代理店も開業時には支社6か所、出張所2か所のみで、ここからも各船主の抵抗が激しかったことがうかがい知れる。

開業当初の航路を見ると本研究の対象地域である大分県別府温泉は第八・第九本線、南紀路線は和歌山までの第十七本線が該当する。第八・九本線の航路は大阪→神戸→多度津→今治→三津浜→長濱→別府→大分→佐賀関までは同じであるが、第八本線は臼杵→佐伯→延岡→細島(日向市)となっている。第九本線は八幡浜→宇和島を繋いでいた。

開業当初の路線はその後名称を変えながらそれぞれ盛衰の道を辿ることになる。その経緯をみると僅かな期間で廃航となった路線がある一方、名称を変えながら存続する路線もあるが、結果として今日まで存続しているのは大阪・神戸⇄別府・大分路線(現フェリーさんふらわあ社)、別府⇄八幡浜(現宇和島運輸)および本州⇄四国間のごく僅かな路線である。

さて、開業当初の航路を見ると幾つかの特徴を見出すことができよう。その一つは、第1本線と第2は本線大阪港から馬関(下関)まで直行で航行し、第3本線も細島(日向市)まで直行している。これらの路線は例えば第1本線には安寧丸340トンが朝鮮半島航路から転属してきている。しかし、これとて340トンの船舶であり、開業に参加した93隻の1隻平均は165トンで500トンを超えるものは光運丸535トンだけであったという¹⁵⁾。

このような小型で老朽化した船舶を使用しての航行であったので、安全性と快適性の両面ではかなり難題であったことは容易に想像できる。とりわけ瀬戸内海は潮流が速いことで有名であり、来島海峡などは幅1.4キロメートルと狭いうえ、潮流は最大10ノット(18km/h)と今日でも難所と言われているポイントである(片上1997)¹⁶⁾。ここを僅か百数十トンの船が行きかうのはかなりの危険を伴うものであっただろう。

4. 別府航路の開設

(1) 大阪商船の進出とそれまでの別府海運

大阪商船による別府航路の開設は前述した通り1884(明治17)年の開業とともに第8本線および第9本線の寄港地として開かれた。当時の記録をもとにそれぞれの路線について見ていく。

第八本線は「大阪細島線」として開設された。寄港地は神戸・多度津・今治・三津浜・長濱・別府・大分・佐賀関・臼杵・佐伯・延岡であった。開業当日の5月1日に佐伯丸が大阪港を出港している¹⁷⁾。

第九本線は「大阪四国航路」として開設され、神戸・多度津・今治・三津浜・長濱・別府・大分・佐賀関・八幡浜・宇和島の航路であった¹⁸⁾。このように大阪商船開業当初別府港は途中の寄港地と位置付けられていたのである。

明治17年当時の別府は、ようやく湯治場機能主体のローカルな温泉地から、温泉観光地に変わりつつあった時期である。因みに数多く出された「温泉番付」のひとつで、1888(明治22)年に刊行された『島崎直次郎編「大日本帝国温泉一覧表」』では別府温泉は東前頭2枚目にランクインされている。しかし後に別府観光のメインとなる地獄地帯は未整備な状態であった。

この別府航路であるが、大阪と航路が結ばれたのは大阪商船が航路を開くよりも11年前の1873(明治6)年に大阪商船で18トンの西洋式蒸気船「益丸(えきまる)」を就航させている¹⁹⁾。この路線は月1往復であったが別府の新時代を開く第一歩となったことは間違いない。しかし、その僅か2年後には橋本孫六、山田耕平、大野六郎治、堀礼蔵らが「満珠丸」、「安全丸」などの複数船舶を就航させ早くも競争時代となった²⁰⁾。

1890(明治13)年には別府の豪商荒金猪六が別府会社を立ち上げ「山城丸」を、さらに1893年には岡山開行舎が、「運輸丸」「幸運丸」の2隻の外輪船を就航させるなど過当競争状態にあった²¹⁾。

大阪商船はこうした状況の中で別府を寄港地とした「大阪細島線」を運行したのである。それ以前に大阪と別府を結んでいた橋本孫六・荒金猪六、岡山開行舎らの船主たちが大阪商船設立にどのように関わったのかは今後検討しなければならない。

(2) 山岡順太郎による別府航路開拓

大阪と別府を結ぶ航路が開設された9年後の1893(明治26)年に大阪商船會社は株式会社となった。また同年に勃発した日清戦争により日本の領地となった台湾に航路を開き、さらに揚子江(長江)航路をはじめ大陸航路も開設していった。しかし、日清戦争後終戦後の不況により経営は危機に陥り、時の社長中橋徳五郎は社内組織の再編を進め、当時進めていた外航路線と瀬戸内海路線を中心とした国内航路を完全に分離させ、後者は「内航部」として再出発させ、部長に就任したのが山岡順太郎(以下、山岡)であった²²⁾。

山岡は内航部の組織を立て直すとともに別府航路を新設した。では、なぜ山岡は経営が必ずしも順調とは言えなかった時期に別府航路開設に目を付けたのだろうか。

まずは、その当時における大阪商船そして瀬戸内海航路の視点から考察してみよう。明治中期以降の我が国の国内海運の多くは延び行く鉄道とし烈な競争に晒されていた。瀬戸内海航路に関して言えばそれはおのずと山陽鉄道との競合を意味する。山陽鉄道は大阪商船が開業した4年後の1888(明治21)年1月に設立され、同年11月には早くも兵庫・明石間を開通させ、さらに同年12月には姫路まで延伸している。そして1901(明治34)年には馬関(下関)までの全線開業を成し遂げている²³⁾。

さて、海運と鉄道の競合に関しては往々として鉄道の優位性が指摘されてきたが、三木(1995)は、山陽鉄道が全線開業して10年以上経った1913・14(大正2・3)年度における大阪と瀬戸内海航路の収入構成は、旅客収入が62%であることを示して指摘している²⁴⁾。確かに収入構成上は鉄道開業後も海運業界では旅客が多くを担っていたであろうが、その収入額の変化については問うていないのでその全容を確認することが今後の課題といえよう。何れにせよ三木の主張のように瀬戸内海の山陽寄港航路においては鉄道開業後も暫くは旅客輸送のシェアを一定程度確保していたことは事実であろう。

山陽鉄道側からも海運との競合の厳しさを示唆する動きを示している。それは運賃の設定から垣間見ることができる。例えば、神戸・姫路間が開業して間もない頃の運賃(何れも下等運賃)を見ると、山陽鉄道は34銭に対して汽船は30銭であった(三木1995)²⁵⁾。速達性を鑑みれば4銭の差額はそれほど大きなものではなからう。さらに貨物運賃は和船(木造帆船)がかなり有利な立場にあった。さらに、山陽鉄道は1900年前後には食堂車や寝台車を運行するなどのサービスに努めた。その背景には海運との競合を意識したとも受け止められる。

こうした事態を総合すると、大阪から馬関よりもさらに遠い九州の別府は鉄道との競合を考慮する必要性はほぼ皆無であったと考えられる。むしろ当時の鉄道を取り巻く環境つまり所要時間(速達性)と乗り心地を考えると、船舶が圧倒的に優位にあったのではないか。

次に別府航路開業当時の別府の状況という視点から見てみよう。別府温泉は明治中頃に“湯突き”と呼ばれる上総掘りによる泉源開発が始まり、1905(明治38)年には198か所(孔)だった泉源は、1911年(明治44)年には593か所(孔)にまで増え、正しく本格的な温泉開発が軌道に乗った時期といえよう²⁶⁾。温泉開発の本格化とともに所謂“健全な温泉観光地”を目指す動きも出ており、当時の町長日名子太郎は「別府町上等温泉規程」を出して風紀の乱れなどを取り締まっている。また、旅館の数も増加しており1909(明治42)年刊行の『別府温泉誌』には別府町と浜脇町合わせて126軒の旅館が掲載されている(永野2018)²⁷⁾。

この日名子町長は町の発展に尽くしている。例えば、1909(明治42)年には市区改正条例を可決させている。

これは今日の都市計画に該当するもので、別府駅開業(1911年開業)に向けて駅を挟んだエリアの街路を基盤の目状にするもので、1928(昭和3)年に完成させている²⁸⁾。今日のJR別府駅周辺街区は当時のものである。さらに、浜脇から北浜に及ぶ海岸の埋め立て工事もあり、始まり艱難辛苦の末市区改正事業の終了とほぼ同時期に完成している(図2、写真1)。

日名子は当時街はずれであった山の手地区に別府公園を造成したり、また広まりつつあった新聞紙上を使って宣伝するなど別府のPRに尽力した²⁹⁾。

このように、明治末期の別府は正しくローカルな温泉場から温泉観光都市に生まれ変わろうとしている時期であったといえよう。



図2. 別府市市区改正図

注)何れも別府史資料より



写真1. 別府市埋め立て事業写真

山岡の別府航路開設に対しては「別府の将来性を買った」などと評価されているが、確かにその部分は大きなウエイトを占めていたであろうが、彼は1898年には大阪商船の社長となる人物であり、その他にいくつかの会社設立にかかわった実業家である。さらに内務省が提案した田園都市構想に係わり大阪千里丘の宅地開発でも手腕を発揮し、後に関西大学学長も務めた人物でもある。別府航路開設は実業家としての確かな計算があったのではなかろうか³⁰⁾。

当時の状況を鑑みると、大阪から別府への航路は鉄道との競合にはならないとした確かな計算があり、山陽鉄道のサービス攻勢にも刺激を受けたことも推測できよう。山岡は別府航路に中国の揚子江(長江)路線に就航していた「紅丸」を導入した。1,399トンという当時の国内航路では破格の大型船を導入し「海の女王」と呼ばれた³¹⁾。

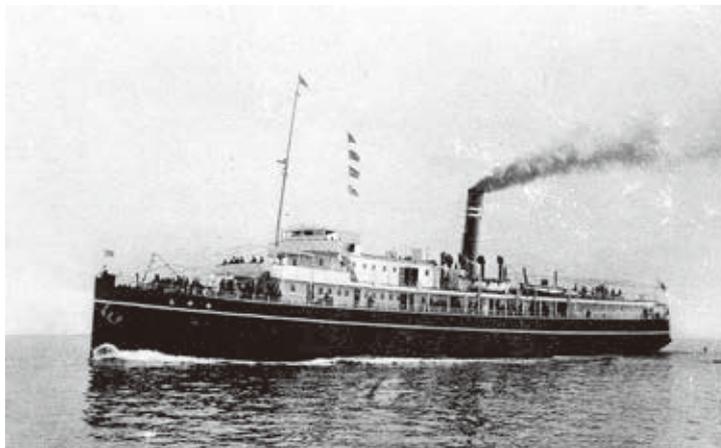


写真2. 大阪商船「紅丸」

注)別府史資料より

紅丸の船内施設は「ベッド付き1等」は定員20名、2等は畳の上に毛せんを敷き、カーテンで仕切り定員は152人、3等は畳だけのであるが定員292名で、これは当時の貨客船の定員の2倍という大きさであった。さらに浴室・娯楽室も完備し、速度も12ノット（時速およそ22キロ）と当時としては類を見ない速度であった。

当時のダイヤは隔偶数日（中3日おきの偶数日）に大阪を出港し別府までは丸1日を要した。しかし、鉄道ならば関門連絡船を乗り継がねばならず、その上お世辞にも快適と言えない硬い座席に長時間座りっぱなしの苦痛を伴う旅行を強いられた。

1916（大正5）年には大阪商船専用棧橋が完成し、これによって紅丸も接岸可能となった。1923（大正13）年には「屋島丸」も就航し輸送力を増強している。このことから大阪・別府航路は人気を博していたことがうかがえる。その後も1936（昭和11）年までに、「紫丸」「紅丸（2代目）」「緑丸」「堇丸」「に志き丸」「こがね丸」の1500～1900トン級の6隻が相次いで就航させた³²⁾。

別府航路の最大の特徴は何と言っても「旅客専用のリゾート船」であった。当時の常識を破る大型且つ豪華な船舶を観光客向けに設えるという、常識を覆す戦略に出たことである。

この常識を覆す戦略が功を奏した背景には、明治も末になると国内では産業革命が佳境を迎え、国民生活にも大きな変化が生じたことは見逃せない。明治中期までの国内観光は外国人の特権ともいえる状況下であり、近代国家日本の観光黎明期は外国人の手によって成されたといっても過言ではない。

この頃になると、日本人の間でも観光を楽しむという生活上の変化が起きてきたのである。これを後押ししたのは鉄道網の発達であり、私鉄各社が都市部と有力な寺社仏閣を結んでいわゆる“初詣”が一般化したこと、鉄道省を中心として全国で観光宣伝が活発化したことなど様々な要素が絡んでいるが、これらに関する研究蓄積は多いので参照していただきたい。

また鉄道に対しては、鉄道が未発達であった四国と山陽地方を結ぶ航路が健在であったことなどから、競合相手というよりも連携相手として考えていたとも推測できる。

また、別府温泉側においても港を観光の中心に据えていたことがうかがえる。1922（大正12）年には別大電車が別府棧橋（別府港）まで延伸され、船着き場が観光の拠点となった。その後1928（昭和3）年の地獄めぐりバスの発着も船着き場に定められたのである。

別府観光の発展を語るうえで油屋熊八は必ず登場し「別府観光の父」とも称されているが、彼が別府の地で活躍するのは山岡による航路開設から10年以上も後のことである。別府温泉の発展史において山岡の功績は評価すべきであるし、彼に関する研究も進めていくべきである。

5. 紀州航路の開設とその後

(1) 紀州航路の黎明期

大阪商船による紀伊半島進出は、大阪商船は開業1884（明治18）年とともに第十七本線として大阪・和歌山航路を開いたのが始まりといえよう。

紀伊半島は紀伊山地が海岸近くまで迫り、その上海岸は入り江の多い複雑な地形を呈しており陸上交通の発展は限定的なものであった。1880（明治14）年三輪崎町（現熊野市）の有志三人は大阪に上り汽船寄港の尋常運動を展開したという。その4年後大阪の鴻益社によって第一鴻益丸（70トン）が就航することとなった。三輪崎町史によれば、「熊野航路最初の航海にして又当港イノ一番の寄港となす、夫れより、第一鴻益丸（七十噸型）太安丸（同型）健壽丸（三百噸型）等相尋で來航し、隔日又は三日四日毎に尾阪間を往復したるが、大阪三輪崎間にては和歌山田辺串本の三港に寄港せしのみ…」と記されている。これが紀州航路の嚆矢と言えよう³³⁾。

その2年後には地元資本の神田汽船が開業し神田丸・熊野丸・宇都宮丸の体制で運航している。当時の様

子について「明治 20 年 10 月西牟婁郡串本町に神田汽船会社起り資本金 5 万円を以て神田丸・熊野丸・宇都宮丸の三艘を使用し大阪より紀勢沿岸を航し当港を経て熱海に達する航路を開始せしむが、翌 21 年 10 月愛知県下尾州共立汽船会社の共立丸亦航路を開始漸次船数を増して当港に寄港して大阪熱海間を往復せり…」との記録が残り、地元の神田汽船に続いて県外資本(愛知県)の共立汽船も航路を開設している³⁴⁾。これに対して神田汽船は資本を増強して対抗していたようだが、1890(明治 23)年には両社は合併して「日本共立汽船株式会社」を設立した。しかし、1898(明治 32)年には大阪商船が航路を開いたことにより新会社は大阪商船に吸収されていった。その後一時的に海運会社が設立され大阪商船に対抗したとの以下の記録があるが…、

「明治 45 年の頃共同汽船会社起りて一時商船会社に対抗したりしたが久しからずして休止するに至れり…」一時的なものであったようだ³⁵⁾。

対抗海運会社が続かなかつたこと背景としては、大阪商船はその前年 1911(明治 44)年に「大阪・三輪崎急航線」を開設したことが大きかったと推測される。

筆者は拙論で当時の状況を解説しているが、紀伊半島最南部は地形的な条件が立ちばかり鉄道敷設が進まなかつた。故に大阪商船はおよそ 20 年間で航路を延伸(延航)し寄港地を増やし利便性を高めていった。とりわけ 1899 年の延航は、地元荷主および大阪郵便局から強い要望がなされた結果とも記されており、地元の期待の大きさともに郵便制度の整備拡大の様子が見て取れる(中山 2021)。

表 1 大阪商船の紀伊半島航路の変遷(開業から勝浦進出まで)

西暦年	元号年	航路線	寄港地
1884	明治 17	大阪商船開業 大阪・和歌山線運航開始	
1899	同 32	4/1 田辺まで延航 大阪・田辺線と改称	兵庫、和歌山、湯浅、比井、御坊
同	同	12/27 三輪崎(現新宮市)まで延航 大阪・三輪崎線と改称	和歌山、湯浅、比井、御坊、田辺、串本、古座、勝浦
1911	同 44	大阪・三輪崎急航線と改称	和歌山、御坊、田辺、串本、勝浦
1915	大正 3	大阪・勝浦線と改称	

出典)中山(2021)、174-175 ページ。

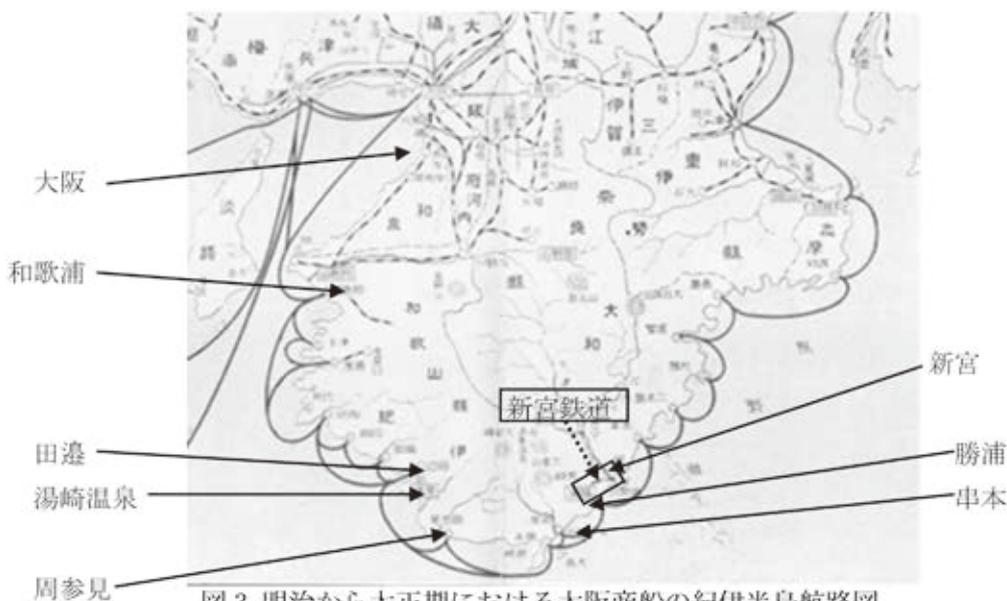


図 3. 明治から大正期における大阪商船の紀伊半島航路図

出典)大阪商船株式会社(1927):紀州航路案内から一部抜粋

しかし大正期に入るとこの地域にも鉄道敷設の波がひしひしとやってきたのである。1913(大正2)年に新宮鉄道の勝浦・三輪崎間(10.1km)が開通したのを皮切りに、翌年には三輪崎・新宮間(5.3km)も開通し、新宮と勝浦という紀伊半島南部の主要都市が鉄路で結ばれたのである³⁶⁾。

この開通は大阪商船にとっても脅威に映ったに違いないが、早々に対応策を講じ新宮と勝浦が鉄路で結ばれた年には既存の航路を「大阪勝浦線」と改称し、勝浦を連絡口として新宮鉄道の旅客を対象とした「船車連絡」としたのであった³⁷⁾。つまり山陽航路と同様に鉄道との連携を図ったといえる。

大阪商船はその後湯崎(白浜)への臨時寄港、往路は和歌浦・比井・田辺・串本にの寄港し、復路は古座・串本・田辺・御坊・和歌浦への寄港を開始した³⁸⁾。さらに1923(大正12)年になると大阪を連絡口として国鉄との間で連携も始めている。このように寄港地を柔軟に設置して常に需要に敏感に応じている様子が伺える。

こうした手法を用いたのも紀伊半島が鉄路で繋がる見通しが立っていなかったことが背景にあったのは間違いない。鉄路が紀伊半島の沿岸を完全に繋いだのは1959(昭和34)年のことである。

(2) 大阪商船による紀伊半島南部の観光開発と南紀航路からの撤退

大阪商船による紀伊半島南部の観光との関わりについては拙論においても多少触れている(中山2021)³⁹⁾。大阪商船は田辺町と新宮町役場に「南紀保勝会(以下、保勝会)」の設立を働きかけ、1923(大正12)年本部を大阪商船会社内に置き、支部を田辺町と新宮町の両役場に設置した。その目的は言うまでもなく保勝会と田辺・新宮の両町を拠点とした南紀地域の観光開発にあった。

その背景には「陸上交通機関の発達により沿岸航路が漸次重要性を失いたる結果に外ならない」と大阪商船株式会社五十年史で述べられている通り全国的に鉄道整備が進み、また自動車も普及し始めたのである⁴⁰⁾。紀伊半島南部は前述したとおり山地帯が海岸に迫る地形によって鉄道敷設が困難であり、海上交通の優位性がまだ保たれていたいわば“最後の砦”であったに違いない。保勝会は阪神地区の市民に向けて鳥瞰図を用いたパンフレットも作成し、南紀地域の宣伝に努めている(図4、5)。



図4. 南紀保勝会作成のパンフレット「紀州名所案内」の鳥瞰図(一部)

出典) 南紀保勝協会 1932(昭和7)年発行

このパンフレットでは「串本と附近」「勝浦と其の附近」「新宮鐵道沿線」「新宮と其の附近」「熊野川と其の流域」といった項目で当時の観光名所が案内されている。

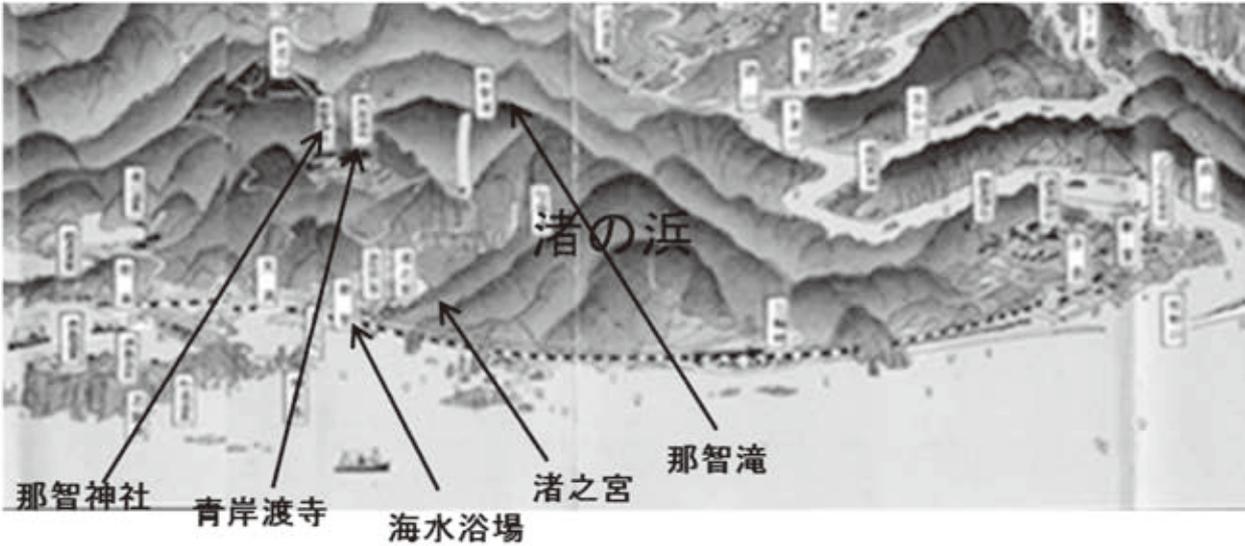


図 5. 紀保勝会作成のパンフレット「紀州名所案内」の鳥瞰図より「新宮鐵道沿線」項目のエリアを拡大
出典) 南紀保勝協会 1932(昭和 7)年発行

ここでとりわけ注目しなければならないのは、独立して「新宮鐵道沿線」の項目を設けている点である。このエリアに那智滝や那智神社など有名な観光スポットはあるが、大阪商船の後ろ盾で設立された保勝会にも拘わらず“鐵道”と銘打って掲載していることから鉄道との共存を強く意識していたと言えまいか。

このことは大阪商船が定期的に発行している「遊覧日程と費用」というパンフレットからもうかがい知ることが出来る。図 6 は 1929(昭和 4)年のものであるが、ここに記されている旅游日程を見ていこう。

日次地名		發着時刻	交通	定置場所	費用概算
一日	大和郡 新宮	發着後	汽船	大和郡新宮汽船	四二〇
二日	新宮 本宮	發着後	汽船	新宮本宮汽船	一〇〇
三日	本宮 新宮	發着後	汽船	本宮新宮汽船	一〇〇
四日	新宮 大和郡	發着後	汽船	新宮大和郡汽船	四二〇
合計					一〇四〇

日次地名		發着時刻	交通	定置場所	費用概算
一日	大和郡 新宮	發着後	汽船	大和郡新宮汽船	四二〇
二日	新宮 本宮	發着後	汽船	新宮本宮汽船	一〇〇
三日	本宮 新宮	發着後	汽船	本宮新宮汽船	一〇〇
合計					一〇四〇

日次地名		發着時刻	交通	定置場所	費用概算
一日	大和郡 新宮	發着後	汽船	大和郡新宮汽船	四二〇
二日	新宮 本宮	發着後	汽船	新宮本宮汽船	一〇〇
三日	本宮 新宮	發着後	汽船	本宮新宮汽船	一〇〇
合計					一〇四〇

図 6. 1929(昭和 4)年当時の大阪商船南紀航路工程表
注) 大阪商船パンフレットより

パンフレットには紀州航路利用コースとしては「其十三那智見物」「其十四瀨探勝」「其十五熊野巡り」を紹介している。これらのコースは大阪を14時30分もしくは和歌の浦16時20分に出航して、勝浦着は翌早朝4時30分となっている。勝浦早朝5時50分発の汽車(鉄道)に乗車するところまでは共通している。

鉄道下車駅は旅程(コース)によって当然まちまちであるが、この資料を見る限り勝浦から鉄道への乗り継ぎを一般化しており大阪商船の戦略的な意図もうかがえる。無論勝浦と新宮間には大型船が横付けできる港の不在も大きな要因ではあるが、移動手段として鉄道のみを紹介している点は強調できよう。

このことを裏付けるように、当時の温泉専門雑誌には「勝浦は熊野遊覧の門戸を為し」「那智、新宮、瀨八丁、本宮、湯峰等を遊覧する人は、大阪から急行船によって此処に上陸」した記されている⁴¹⁾。

このように大阪商船が鉄道との共存を探りながら南紀航路を整備していったとはいえ、その背景として鉄道の全通が見通せない状況にあったことは間違いなからう。

しかしながら、大阪商船は結果的に1934(昭和9)年に紀州航路から撤廃している。前述した通り鉄道が紀伊半島を繋ぐのはその25年後のことである。ここからは本論でも提示した「鉄道との競合に負けた」という理由だけでは語れない背景があったことは明白である。

その最も大きな要因としては大阪商船の経営判断があったと言える。つまりこの時期大阪商船は外国航路に力を注いでいるのである。1931(昭和6)年に結ばれた所謂「郵商協約」によって大阪商船の外国航路は南米東岸航路、中国沿岸航路、大連航路に集約された⁴²⁾。さらに1939(昭和14)年には南米移民船のある「あるぜんち丸」と「ぶら志る丸」を建造し南米への移民輸送を担ったのである⁴³⁾。

また、大阪商船は南紀航路では寄港地を増やしていった。しかしこのことは船の小型化・非効率化という結果を招くことになる。港はそれぞれの海陸の地形や水深の制約を受ける。したがって一番規模の小さな港への寄港が可能な船舶にせざるを得ない。こうした非効率性が要因であったことも否めないがこのことについては具体的な検証が必要となる。

6 大阪商船が温泉地の近代化に果たした役割～まとめに代えて～

今回「大阪商船会社という海運業界が観光地形成にどのような役割を果たしたのか」について考察を進めてきた。旅客海運業は1930年代には鉄道路線、そして1970年代以降は航空路の開設によって衰退していったとの見方が一般的である。確かにその要素は大きいし無視して語ることはできない。

今回の考察によって、明治から昭和初期における国内海運業の実態についてその一例を提示することができた。

第一に国内航路はかなりの期間運賃面で鉄道よりも優位な立場を維持していたことが明確になった。両者は当面敵対というよりも互いに補完しあった関係にあったといえよう。大阪商船は鉄道網の進展が遅れた四国においては山陽鉄道へ連絡航路としての役割も果たし、道後温泉は港と鉄道で結んだ典型的な事例と言え、今日でも伊予鉄道が走っている。加えて、四国は1980年代までは本州とを直結する交通手段がなかったため大阪からダイレクトに繋ぐ海運は大きな役割を果たしたのである。大阪商船はその強みを生かして温泉地の観光地化に大きな役割を果たしたといえよう。大阪商船をはじめとする海運が瀬戸内地方の観光地形成に果たした役割は今後検証する必要がある。

さて、本稿の主題の一つである別府航路はこうした瀬戸内航路の“最終地”と言える位置にある。つまり前述した四国の状況を取り込みながら大温泉地別府を終点としたのである。これは大阪商船にとってはこのエリアで果たした最大の役割と言える。別府航路の松山寄港は何と2011年まで続くのである。なぜこの年まで継続できたのかも今後検討しなければならない。

第二に別府航路は鉄道を意識せずに存続したという点である。一般的に言われている「鉄道との競合に負けた」とするならば当然撤退していた筈である。確かに1970年代は所謂『カーフェリー』ブームがあり全国

各地に航路が開かれたが長くは続かなかった⁴⁴⁾。こうした中でも別府航路は生き残ったのである。

一方、南紀航路は本論でも再三指摘したが、鉄道によって紀伊半島が完全に結ばれる 25 年前に撤廃しているのだ。確かに笠井も指摘するように、当時から「紀伊半島の沿岸を一周する紀勢線の一即ち新宮より串本に通じる紀勢中線の内、下里、串本間二十キロ七六の新線は此程竣成し」さらに「周参見＝串本間の西線が全通すれば、熊野めぐりは、黒潮荒む潮岬を船に抛らず大変便利となる」と指摘されていたように鉄道開業の脅威は強く認識されていたようだ⁴⁵⁾(笠井 2015)。

しかし、大阪商船の南紀航路開拓により陸の孤島状態であった紀伊半島南端部が活気づいたことは確かである。大正末時点では温泉地と呼べる場所は皆無であったこの地域が勝浦温泉と称されるようになり、熊野詣での新しい玄関口となったのである。折しも 1936 (昭和 11) 年の吉野熊野が国立公園に指定されたことは追い風となり、大阪商船は「休暇の一日、二日を、一週間を、避暑に、避寒に、海水浴に、探勝に、遊覧に、神詣でに、入湯に…」と大々的に宣伝している⁴⁶⁾。当時のパンフレットには「大阪神戸を晩に出帆、翌朝田辺、串本、勝浦に到着し、三日目の早朝神戸大阪に帰着しますので・・・、」と夜行便発着を謳っている。これは今日の(株)フェリーさんふらわあが実施している“弾丸フェリー”を彷彿させる記述がみられる⁴⁷⁾。このように、鉄道の脅威を感じながらも紀伊半島南部の観光開発に大きな足跡を残したといえよう。

さて、今回の考察を通して幾つかの課題を見出すことができた。先ず別府航路をはじめとする瀬戸内航路について道後温泉の動向を検討すること。この作業なしでは瀬戸内航路における役割について全体像が明らかになるまい。また、瀬戸内海国立公園の指定との関りについても分析する必要があるだろう。次いで、紀州航路に関しては、昭和初期の内陸交通との関りについて検討しなければならない。さらに、「大阪商船が各地の観光開発とどのように関わったのか」、今回の考察を通してわが国の近代観光形成史という大きな枠組みにおいても重要な事項であることを改めて認識した。

【注・文献】

- 1) 商船三井が 99% 出資。「さんふらわあ」は商船三井の登録商標である。
- 2) 中山昭則(2021): 近代交通網の整備下における温泉地の観光地化に関する比較考察～別府温泉と南紀白浜温泉を事例として～. 大分県温泉調査研究会報告. 第 72 号 43-52 ページ.
- 3) 前出の中山他、笠井雅直(2015): 温泉地開発と鉄道網の確信-歴史的経験-. 名古屋学院大学ディスカッションペーパー 109. 1-257 ページ. 笠井正直(2015): 戦前温泉地を巡る鉄道と汽船の競合に関する試論: 南紀の温泉地をめぐる交通網の確信. 名古屋学院大学論集 社会科学篇. 29-33 ページ. 小池洋一(1962): 白浜温泉観光地の近代的開発(I). 和歌山大学学芸学部紀要 12. 115 ページ. を参照のこと.
- 4) 大阪商船(1936): 『大阪商船株式会社五十周年史』1 ページ.
- 5) 前述 4). 1-2 ページ.
- 6) 前述 4). 3 ページ.
- 7) 前述 4). 3-4 ページ.
- 8) 前述 4). 5-6 ページ.
- 9) 大阪商船三井船舶株式会社(1966): 『大阪商船株式会社 80 年史』8-10 ページ.
- 10) 前掲 9). 9-10 ページ
- 11) 大阪商船三井船舶株式会社(1985): 『創業百年史』. 18-19 ページ.
- 12) 前掲 11). 20 ページ.
- 13) 前述 4). 41 ページ.
- 14) 片上広子(1997): 近代瀬戸内海航路の観光地に及ぼす影響: 大阪を起点とする旅客汽船航路を通して. 史泉 86. 23 ページ.
- 15) 前掲 9). 16 ページ.
- 16) 前掲 14). 25 ページ.
- 17) 前掲 4). 33 ならびに 148 ページ.
- 18) 前掲 4). 33 ならびに 127 ページ.
- 18) 前掲 11), 69-70 ページ.
- 19) 中山昭則(2012): 『文化的景観別府の湯けむり景観保存計画』別府市. 157 ページ.
- 20) 前掲 19). に同じ
- 21) 吉田豊治(1985): 『別府市誌』. 466 ページ

- 22) 大阪商船三井船舶株式会社(1985):『創業百年史』.74 ページ.
- 23) 三木理史(1995):近代瀬戸内海地域における地域交通体系の変容-海陸連絡機能を中心として-. 歴史地理学 175. 1-21 ページ.
- 24) 前掲 23) と同じ.
- 25) 前掲 23) と同じ.
- 26) 中山昭則(2)
- 27) 永野康洋(2018): 近代別府温泉の宿屋の様相と変遷. 別府史談 30-31. 73-94 ページ.
- 28) 前掲 21). 492 ページ.
- 29) 前掲 21). 465 ページ.
- 30) 前掲 11), 74-75 ページ
- 31) 商船三井 HP. さんふらわあコラム Vol.5 栄光の別府航路
https://www.mol.co.jp/casualcruise-sunflower/article/known/konjaku_05/ (2022.02.11 閲覧)
- 32) 前掲 31). と同じ
- 33) 「三輪崎と汽船」<http://www.kitohan.sakuraweb.com/jidai/meiji/m-44-03-05-miwazuki-kisen.htm> (2022.02.11 閲覧)
- 35) 前掲 29). と同じ.
- 36) 前掲 4). 175 ページ.
- 37) 前掲 36). と同じ.
- 38) 前掲 36). と同じ.
- 39) 中山(2021):「近代交通網の整備下における温泉地の観光地化に関する比較考察～別府温泉と南紀白浜温泉を事例として～」. 大分県温泉調査研究会報告第 72 号. 43-51 ページ.
- 40) 前掲 36). と同じ.
- 41) 笠井雅直(2015):「戦前期温泉地をめぐる鉄道と汽船の競合に関する試論 一南紀の温泉地をめぐる交通網の革新一」名古屋学院大学論集社会科学篇, 第 51 巻第 4 号, 27-47 ページ.
- 42) 1931 年に大阪商船と日本郵船が結んだ協約。前年の世界恐慌のあおりを受け日本の海運業界を代表する両社が生き残るために結んだ協定。これにより日本郵船は欧州・北米航路を独占し、大阪商船が南米・近海航路を独占するという「世界分割計画」が実施されることになった。
- 43) 前掲 22). に同じ.
- 44) カーフェリーが続かなかった理由には 1973 年に端を発した「オイルショック」の影響も大きい。
- 45) 前掲 41). に同じ.
- 46) 前掲 41). に同じ.
- 47) 1935 年前後の「紀州航路案内」にみられる。

新型コロナウイルスパンデミックと温泉 ～新しい生活様式は温泉入浴行動にどのような影響を与えたのか？～

別府大学 食物栄養科学部 発酵食品学科

加藤 礼 識・西田 友美子

別府大学 文学部 史学・文化財学科

重光 宏 哉

長崎大学 熱帯医学・グローバルヘルス研究科

阿部 しず代

大阪成蹊大学 経営学部食マネジメントコース

加藤 華 乃

有限会社サンエスマンテナンス

塩見 泰 美

要旨

新型コロナウイルスによるパンデミック対策として2020年5月1日に、政府の新型コロナウイルス感染症対策専門家会議が「飛沫感染や接触感染、さらには近距離の会話への対応をこれまで以上に日常生活に取り入れた生活様式」についての提言を発表し、国民に感染拡大防止のための行動変容を求めた。この「新しい生活様式」という行動変容は、地域に存在する共同組合浴場や市営温泉、さらには温泉観光地にどのような影響を与えたのだろうか？本研究は、別府市営温泉の入浴客数の変化と新型コロナウイルス感染者の推移を視覚的に比較できるようにグラフ化したほか、入浴客へのアンケートを実施し、質的データを用いてパンデミック前後の入浴意向を調査したものである。

1. 目的

2019年末、中国の武漢市で原因不明の肺炎がWHOに報告されて以来、新型コロナウイルスの感染拡大は、世界規模で経済、社会、文化といった人間社会のあらゆる側面にかつてないほどの影響を及ぼしている。感染拡大を抑制または遅延させるための公衆衛生戦略では「社会的距離戦略（ソーシャル・ディスタンス）」が取られ、国民・企業の活動を強制的に制限する「都市封鎖（ロックダウン）」の措置を講じる国や地域が相次いだ。その中で、日本国内では「新しい生活様式」という概念が生み出され、日常生活の各場面においても、感染予防を目的とした行動指針が示されている。新しい生活様式において推奨されている、密集・密接・密閉という3つの密に対する対応や、換気対策、身体的距離の確保、マスク着用などは、地域に存在する共同組合浴場や市営浴場では対応が非常に困難である。また、接触感染対策としても、ドアノブや蛇口、バスツール（バスタチェア）、風呂桶などを使用する毎に消毒することは非現実的であると考えられる。

令和2年5月29日には全国公衆浴場業生活衛生組合連合会が「浴場業における新型コロナウイルス感染拡大予防ガイドライン」を発表しているが、実際には各入浴施設でバラバラの対応となっている。

また違う側面から温泉をみてみると、温泉観光を主要産業としていた地域では、新型コロナパンデミックによる県境をまたぐ移動制限や、外国人の日本への入国を全面的に制限したことなどから、壊滅的な観光客減少につながっている。GoTo トラベル事業などによって、一時的な回復は見られたが、第3波に伴う緊急事態宣言で再び観光客減へと陥っている。現在、新型コロナパンデミックは第6波となり、爆発的な感染者増加となっている。

新型コロナウイルスによるパンデミックや、感染症対策のための新しい生活様式は、温泉入浴行動や温泉観光地にどのような影響を与えているのだろうか。感染症対策が検討される中で、実際にどのような形で温泉入浴行動に影響があったのかという検討は行われていない。そのため本研究は、大分県別府市の温泉に係る団体（別府市温泉課、温泉指定管理者）が持つ量的なデータを分析し、また、温泉入浴を行っている入浴客の質的言語データを収集・分析することによって、新型コロナウィルスパンデミックやその予防対策としての「新しい生活様式」が温泉入浴行動や温泉地にどのような影響を与えたのかを探る多面的な分析である。

2. 方法

本研究では、新型コロナウィルスパンデミックが実際に温泉入浴をする温泉利用者の心理にどのような影響を与えたのかを検討するために、別府市内の共同温泉組合員、温泉入浴観光客を対象にアンケート調査を実施する。また別府市温泉課の保有する温泉入浴者数等の量的なデータを分析し、新型コロナウィルスパンデミック後の温泉入浴者の増減に影響を与えたファクターについて分析する。入浴者の増減に影響を与えたファクターとして、不要不急の外出制限要請、緊急事態宣言発令、県境を越える移動の制限、GoTo トラベルなどが考えられるが、これらの要因が実際に入浴者数と相関があるかという検証は実施されていないため、これらに関する一般入浴客・温泉組合員・観光客のそれぞれで今後相関関係の検証を行うための先行研究として実施する。

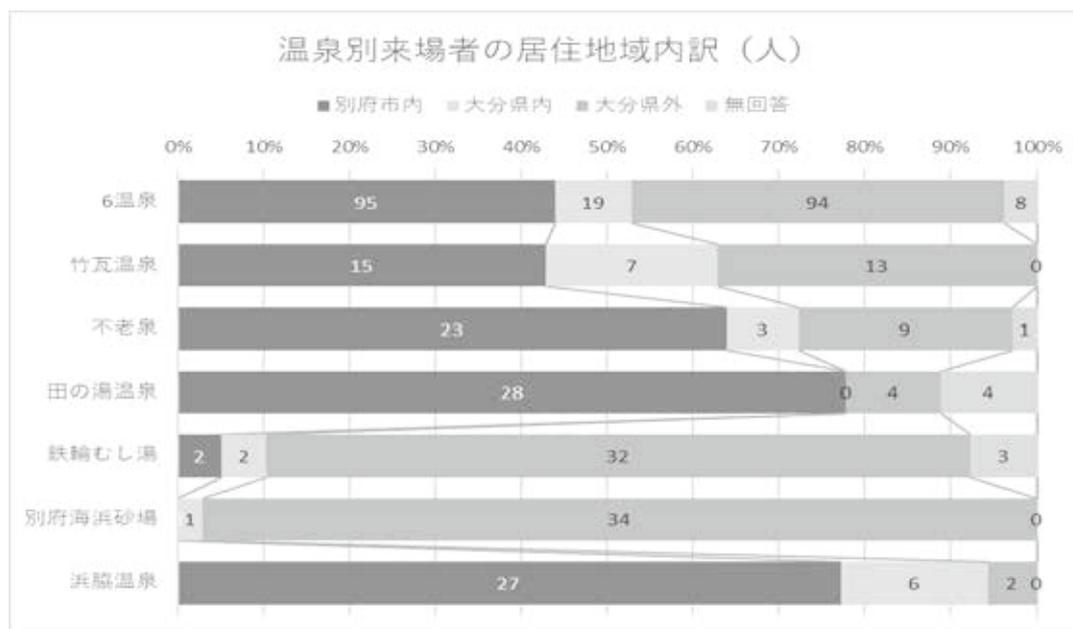
なお、研究計画の時点では施設ごとの感染症対策の実施例の比較、アンケート結果の相関係数調査まで予定していたが諸事情によりアンケート調査実施が大幅に遅れたため、本報告書での検討は断念し、次年度以降の課題とする。

3. 結果

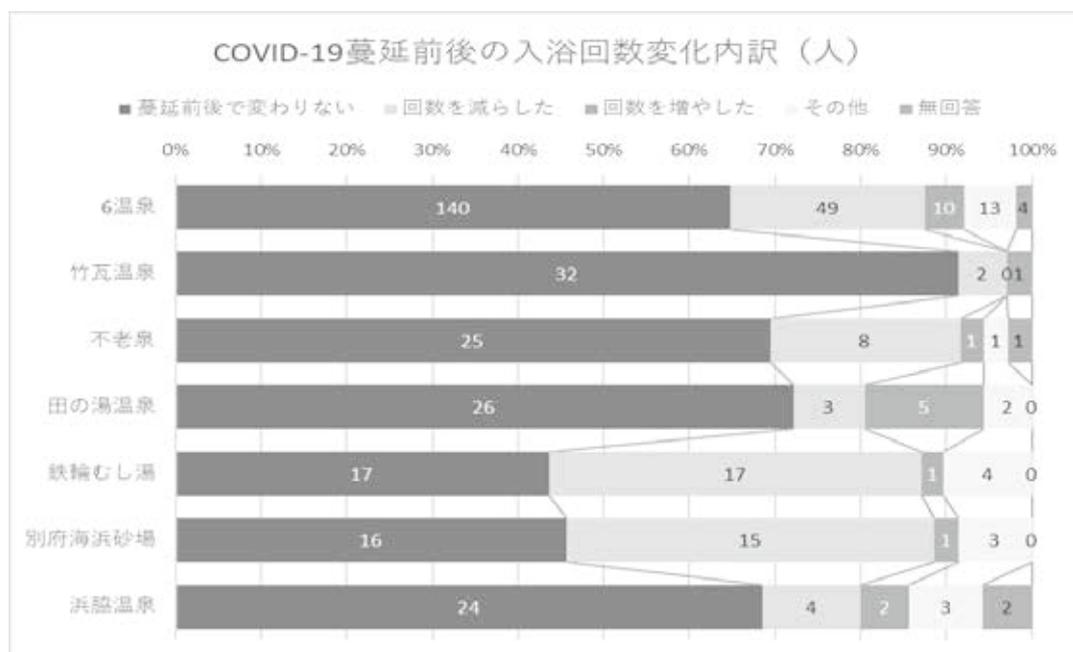
(1) 入浴者への意識調査

2021年12月1日から12月25日までに別府市営温泉6湯（浜脇温泉・田の湯温泉・不老泉・竹瓦温泉・鉄輪むし湯・別府海浜砂場）の入浴者を無作為に選び、アンケートを実施した。調査内容は、年齢・性別・居住地などの基本属性のほか、当該温泉の利用回数、当該温泉の満足度、蔓延前後での入浴回数の変化、蔓延前後での入浴場所の変化、入浴時間、入浴施設選択時に気になることの6項目である。6湯合計で216人から回答を得た。温泉利用者の居住地は以下の表のとおりである。田の湯温泉・浜脇温泉は、入浴者の9割近くが大分県内からの入浴であるのに対し、鉄輪むし湯・別府海浜砂場は9割が県外からの入浴であった。不老泉は県内からの入浴者が7割、竹瓦温泉は県内からの入浴者が6割となっている。そのため、結果(2)では各温泉を地元密着型温泉（浜脇温泉・田の湯温泉）・複合型温泉（不老泉・竹瓦温泉）・観光特化型温泉（鉄輪むし湯・別府海浜砂場）というように振り分

けている。

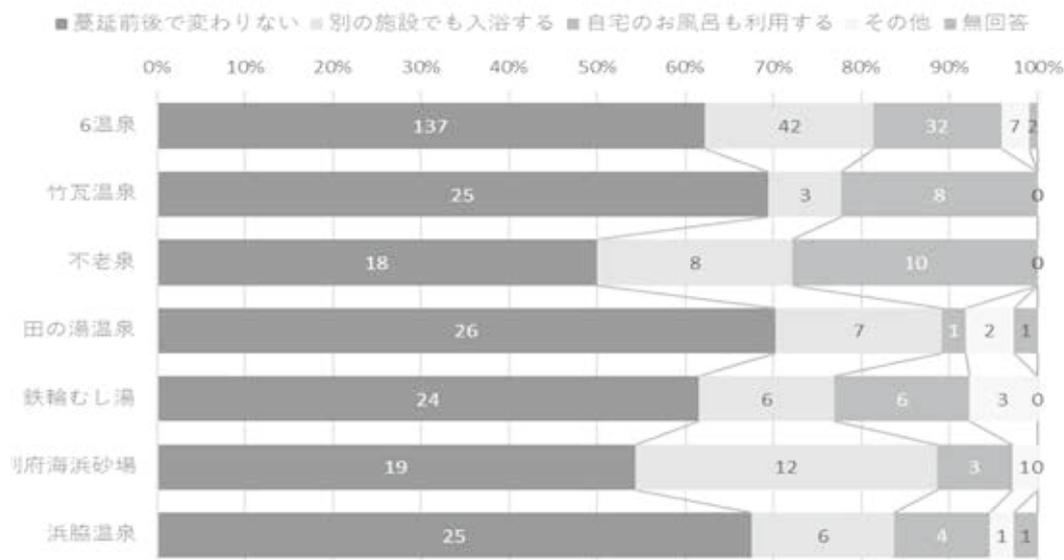


新型コロナウイルスパンデミック前後の入浴回数の変化については、観光特化型の温泉を利用する入浴者で、入浴回数を減らしたという傾向がみられたが、地元密着型温泉・複合型温泉では蔓延前後で変わらないと答えたのが6割を超えていた。竹瓦温泉の利用者に関しては9割で入浴回数に変化がないと答えている。



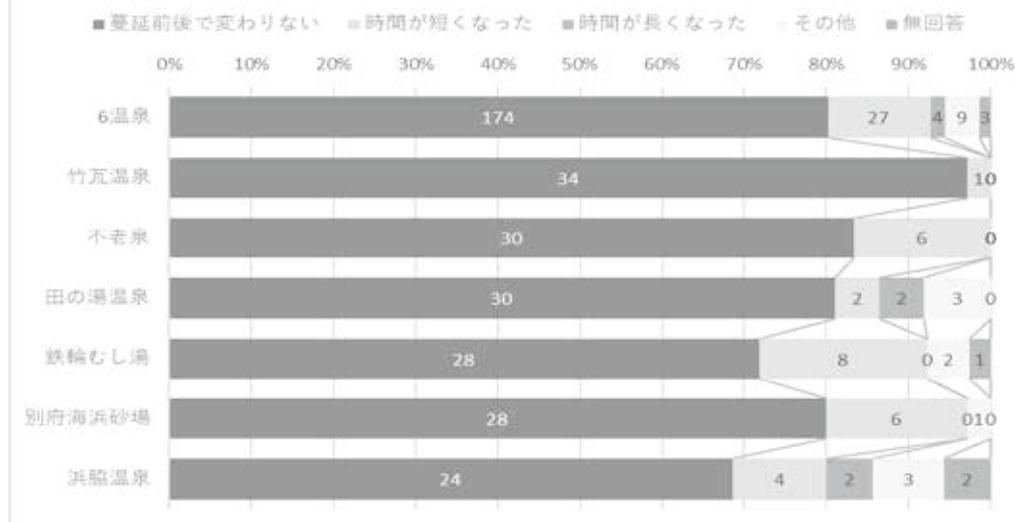
新型コロナウイルスパンデミック前後の入浴施設の変化については、すべての温泉において、蔓延前後で変わらないと答えたのが半数を超えており、地元密着型温泉・複合型温泉・観光特化型温泉に差は見られない。

COVID-19蔓延前後の入浴施設変化内訳（人）

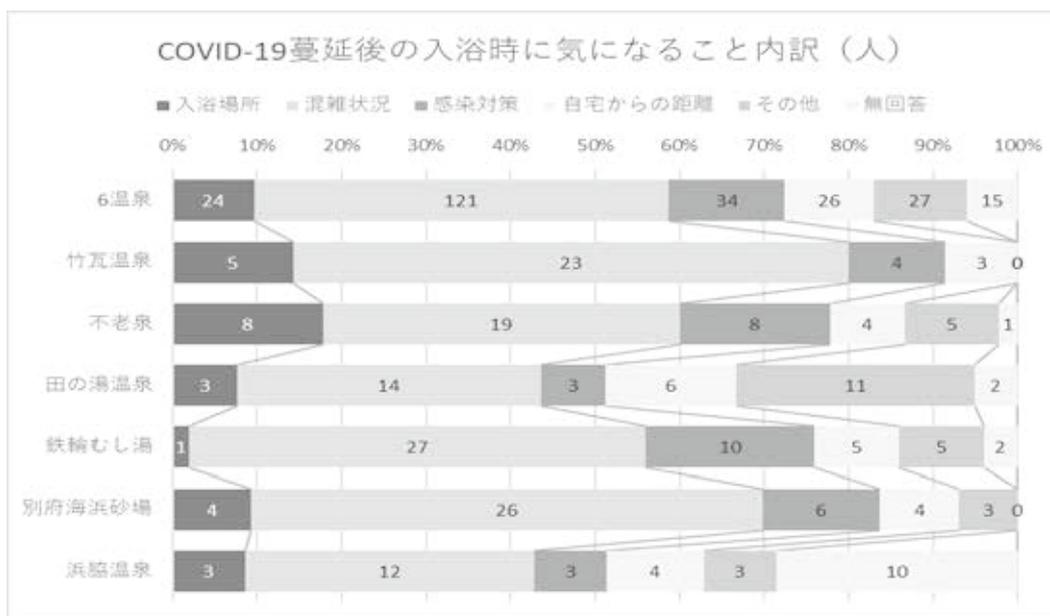


入浴時間に関しても、各温泉ともに蔓延後に入浴時間が短くなったと答えたのが5~15%程度いたものの、特記すべき差があるとは言えない。

COVID-19蔓延前後の入浴時間変化内訳（人）



温泉施設での入浴時に気になることを尋ねた質問では、多くの施設で混雑状況を気にしていた。温泉入浴施設が十分な感染症対策をとっているかどうかを気にしている温泉利用者は15%程度であった。



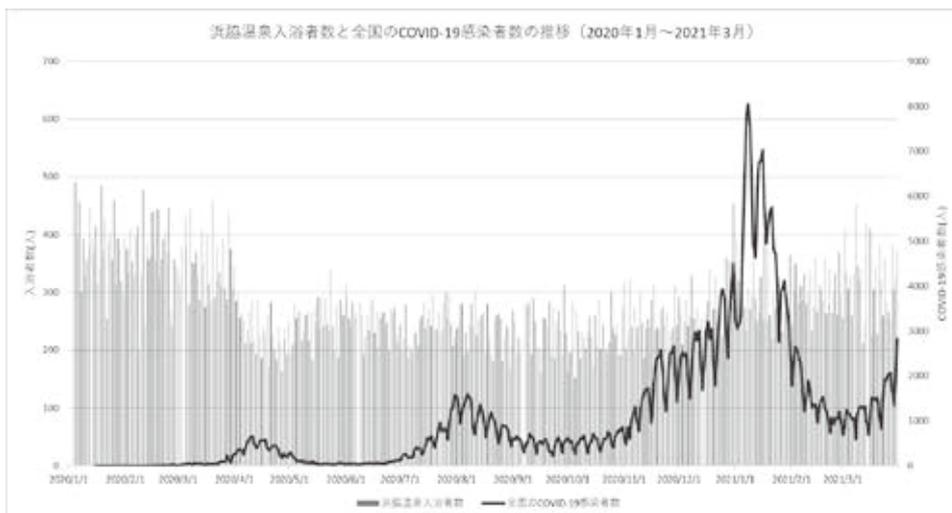
(2) 第3波までの入浴者数推移と感染者数

別府市温泉課より提供していただいた、市営温泉6湯（浜脇温泉・田の湯温泉・不老泉・竹瓦温泉・鉄輪むし湯・別府海浜砂場）の利用客数を、アンケート調査での各温泉を利用したものの居住地情報から地元密着型温泉（浜脇温泉・田の湯温泉）・複合型温泉（不老泉・竹瓦温泉）・観光特化型温泉（鉄輪むし湯・別府海浜砂場）の3つに振り分け、新型コロナウイルス感染症の患者数推移が温泉入浴行動に変化を与えたかどうかを可視化できるようグラフ化した。

① 地域密着型温泉（ジモ泉）

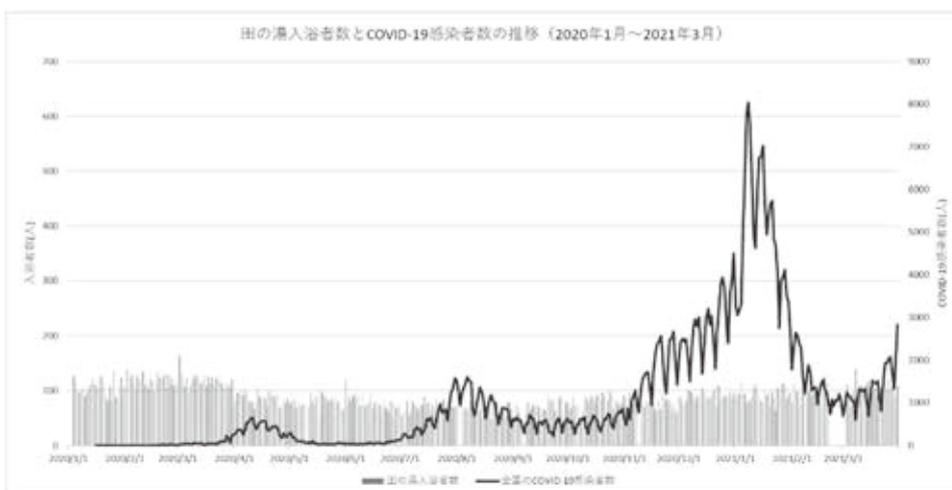
I、浜脇温泉（2019年度入浴者数 110,380人）

浜脇温泉の一日の入浴客数は、2020年4月15日をピークとする第1波の発生までは400名程度で推移していたが、コロナ禍以降3割程度の入浴客数の減少（2020年3月と4月の比較）となっている。第1波に対しては入浴客数が反比例的に減少していたが、第2波、第3波に対しては入浴者数が減少するような反応は見られなかった。



II、田の湯温泉 (2019年度入浴者数 32,873人)

田の湯温泉は、別府市営温泉の中でも特にジモ泉の要素が強い温泉であり、1日の入浴客数は100名程度と安定している。第1波の発生以降、3割の入浴客数減少(2020年3月と4月の比較)はあったものの、感染者数の増減に反応するような入浴客数の推移は見られない。



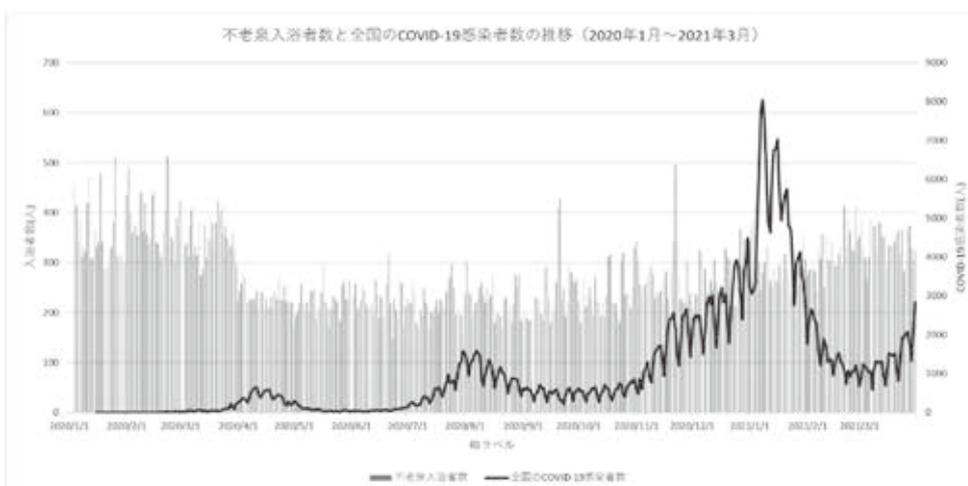
以上のように、別府市内においてジモ泉と呼ばれる、地域住民の入浴者が主となる温泉については、新型コロナウイルスパンデミックの影響はあまり受けることなく、入浴者数の減少も2~3割減という範囲でとどまっている。

② 複合型温泉(観光・ジモ泉混合型)

I、不老泉(2019年度入浴者数 119,689人)

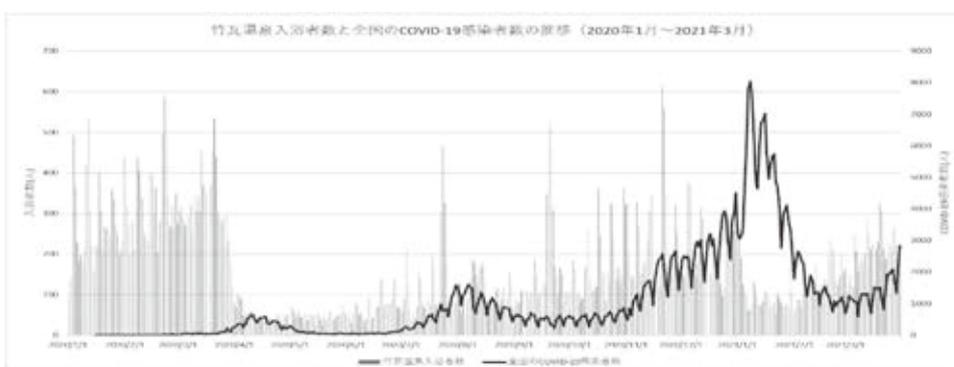
不老泉は2020年3月まで月平均1万人の入浴者数が、安定的にあり年間入浴者数が約13万人程度である。第一波以降、1月の入浴者数は6,000人程度まで減っているが、感染者数との相関はほとんど見られない。一定数の地元の固定客と、駅に近いという立地条件により訪れる観光入浴客から構成されていると推測され新型コロナウイルスパンデミック

の発生によって、観光入浴客が減少したものの、固定客の入浴は継続したものと推測される。



II、竹瓦温泉（2019年度入浴者数 108,977人）

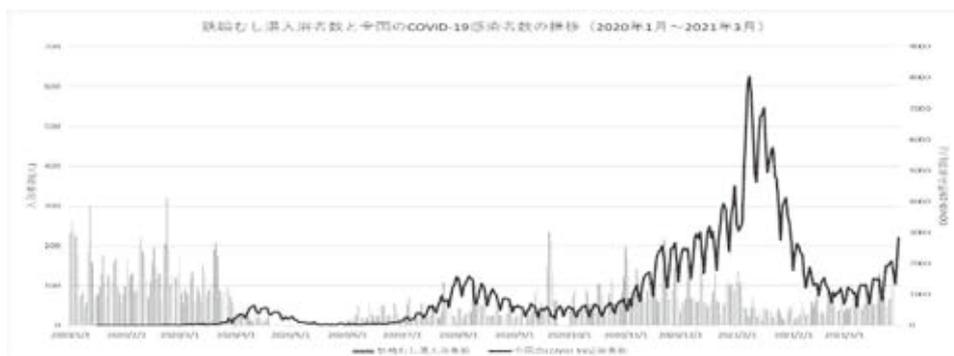
竹瓦温泉は昭和13年に建築された木造二階建ての建造物が登録有形文化財となっており、別府湯めぐりを代表する観光特化型温泉である。2019年3月には1か月の入浴者数が約13,000人おり、2019年5月3日は1日の入浴者数が1,350人と最高を記録した。別府湯めぐりの中心的存在であったといえるが、新型コロナウイルスパンデミック発生後は、9割以上の入浴者数減少があり、2020年5月3日には62人にまで減少した。前年と同じ祝日でありながら95%減少している。



③ 観光特化型温泉

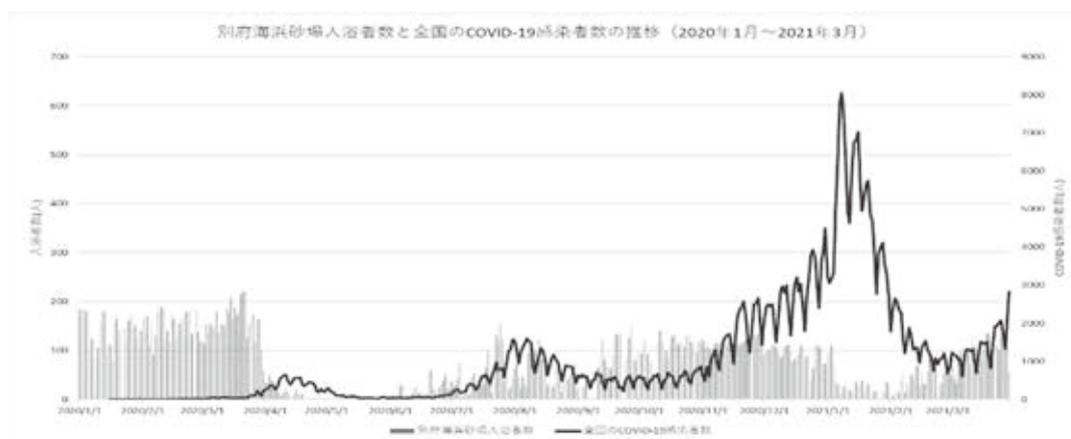
I、鉄輪むし湯（2019年度入浴者数 39,595人）

石室の中に敷き詰められた石菖(せきしょう)といわれる薬草が、温泉熱に蒸されることによって、鎮痛成分等を芳香させる。その成分を皮膚や呼吸により吸収させることを目的とした湿式サウナである。2019年4月29日には1日に437人の入浴者数を記録している。新型コロナウイルスパンデミックの発生に伴い、2020年4月20日から5月31日まで臨時休業しており、第1波との相関を見ることはできないが、第2波と第3波の発生に合わせて入浴客が減少していることが見て取れる。



II、別府海浜砂場（2019年度入浴者数 55,703 人）

別府市の海岸沿いに幅 6 メートル、長さ 20 メートルにわたって設置された砂風呂で、昭和 61 年より営業している。2019 年のゴールデンウィークやラグビーワールドカップ期間中には 1 日の入浴者数が 200 人を超えていた。2020 年 3 月中旬までは 1 日 100～150 人の入浴者数で推移していたが第 1 波発生直後に急激に減少し、4 月 9 日以降は 1 日 10 人程度となった。4 月 20 日には鉄輪むし湯と同様に感染予防対策として臨時休業となった。第 2 波、第 3 波の発生時には、感染者数の波に合わせるように入浴者数の減少がみられている。



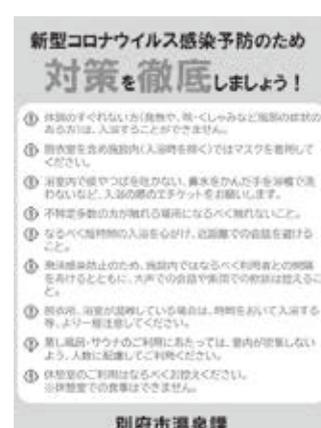
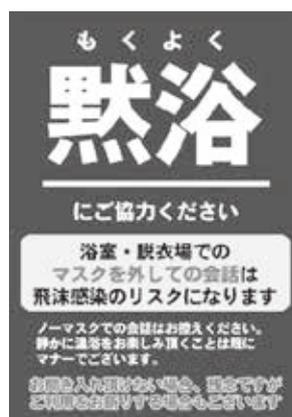
新型コロナウイルスパンデミックと温泉入浴者数の関係に関しては、温泉入浴客の属性によるところが大きいと考えられる。入浴客が地域住民を中心としている「ジモ泉」では、感染者増加との相関は低く、観光客向けに特化した温泉では感染者数増加との相関が大きいことがわかる。

4. 結論と考察

本研究は、温泉施設の利用者に受付窓口で声をかけ、アンケート回答に理解を得られた入浴客からのアンケート調査である。そもそも温泉を利用している人を対象としたアンケートであるために、自己選択バイアスが働いていることは否定できない。そのため、好んで温泉を利用する者が、どのような意向を示したかという結果以外の議論をすることはできない。

その上で、今回調査した6つの別府市営温泉を、入浴客層の違いから地域密着型温泉（ジモ泉）、複合型温泉、観光特化型温泉の3つに分けて考えることができることが示唆された。そして、3つのタイプの温泉で、観光に特化した鉄輪むし湯・別府海浜砂場は、コロナ感染拡大の波によって入浴者数の増減に影響を受けやすく、一方で地域密着型の温泉は影響を受けにくいことが視覚的に判断できるグラフとなった。これは観光特化型温泉が、大分県外や別府市外からの入浴者が多いという偏りが、コロナウイルスパンデミック時に発動された「県境をまたぐ移動制限」や「不要不急の外出自粛」、「緊急事態宣言」、「まん延防止等特別措置」によって起こった人流の減少が直撃したものである。それに対して地域密着型温泉は、日常的な入浴に利用している割合が高く、入浴者数の減少は3割程度にとどまった。複合型温泉に関しては、大きく入浴者数が減少した竹瓦温泉と3割程度の減少にとどまった不老泉との間で、入浴者数に関係する何らかのファクターが存在することが考えられる。とにかく観光に特化した温泉はコロナウイルスパンデミックによって大打撃を受けたといえる。

2020年5月に発表された「新しい生活様式」では、密集・密接・密閉の3密を回避すること、マスクをすること、会話を減らすことなどが感染症対策に有効な新しい行動指針として示されたが、温泉入浴の場でこのような対策をとることは現実的ではない。多くの入浴者が、浴室の混雑状況を気にする傾向にあったが、温泉施設が十分な感染対策をしているかどうかを気にしている割合は15%程度と低かった。



温泉施設によっては、入浴時にマスクを着用し、会話をしないように「黙浴」という言葉を用いて感染リスクを下げるように啓発している施設もあったほか、ロッカーを物理的に閉鎖しソーシャルディスタンスを確保しようとする試みも散見された。しかし、入浴者の意識としてはそこまで施設による感染症対策を意識していないのが現実のようである。別府市温泉課では、①体調不良者の市営温泉利用の自粛②施設内（入浴時を除く）でのマスク着用③入浴の際のエチケット向上④不特定多数が触れる場所を触らない⑤短時間入浴・会話の自制⑥間隔をあげ集団での歓談を控える⑦脱衣所、浴室混雑時のより一層の注意⑧蒸し風呂・サウナ利用時の人数配慮⑨休憩室利用の自粛をポスターにより呼び掛けている。また別府市のホームページ上に市営温泉の混雑予想時間を掲載し、感染予防対策をとるようアナウンスしている。しかしアンケートの結果からは、入浴時間の短縮などの行動変容は見られず、このアナウンスが十分に効果を発揮していない可能性も考えられた。地域密着型温泉（ジモ泉）は地域のコミュニティとして重要な役割を果たしてきたという背景もあ

り、温泉入浴に関する行動変容を強く地域住民に求めることが難しかったことが原因として挙げられる。

本研究では、新型コロナウイルスパンデミック時における、温泉入浴者の意向について調査し、特に観光特化型温泉においてその施設での温泉入浴を避ける可能性があることが示唆された。そして実際に温泉を日常的に利用している者にとっては、施設が行っている感染対策よりも、その施設の混雑状況が入浴するかどうかを選択する要因になっていると推測され、今後それを仮説とした大規模な調査を実施して検証していく必要がある。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、別府市役所温泉課、別府市総合振興センター、ケービックス株式会社、NPO 法人鉄輪湯けむり倶楽部、有限会社サンエスマンテナンス、別府大学温泉愛好会をはじめ多数の方々の協力をいただきました。また、本研究遂行にあたり、大分県温泉調査研究会からの研究助成をいただき研究が実施できたこと、終始暖かい支援をくださいました別府市営温泉利用者の方々に、厚くお礼を申し上げます。

エンジョイ 別府温泉とオーガニック&ヘルシーな 地元食材を体感しよう

立命館アジア太平洋大学
マヒチ・ファエゼ

対象地域（市町村名）： 別府市

研究期間： 令和3年(2021年)10月1日～令和4年(2022年)3月31日

研究目的： 本研究の目的は、別府温泉とオーガニック・ツーリズムの融合を探究することにあります。地元産の旬の有機食材（野菜、米、果物等）を活用し、地産地消を目指し、別府を訪れる観光客に新鮮で栄養価が高く味わい深い食事を楽しんでいただきます。研究の成果として、別府のオーガニック・ツーリズムを発展させ、有機栽培農家やコミュニティの活動をサポートすることが期待されます。

研究内容： 有機野菜の生産者である神鳥浩恵さん、おおいたオーガニック・マーケットの主催者 後藤亜紀子さん及び旅館山田別荘 経営者である山田るみさんを中心に、ワークショップを開催しました。日本の伝統的かつ健康的な食材と温泉を活用し、利用者に対し、おもてなしと体により良い食事をいかに持続的に提供していくかについて議論しました。

2022年3月16日に別府の亀の子茶屋で4時間のワークショップを実施しました。

参加者は以下の通り。

- 1) オーガニック野菜の生産者として 神鳥浩恵さん
 - 杵築市の有機農園 神鳥農園 (<https://www.facebook.com/kandorinouen/>)
- 2) 事業者として（温泉・旅館・飲食店・イベント主催者等）
 - 老舗旅館 別府山田別荘 経営者の山田るみさん (<http://yamadabessou.jp/>)
 - おおいたオーガニック マーケット主催者 後藤亜希子さん
(<https://www.facebook.com/oita.organicmarket/>)
 - 別府の亀の子茶屋 運営者 高橋伸子さん
- 3) 次世代を担う若者として
 - APU 学生1名 持続可能な開発専攻
 - 東京理科大学学生1名 バイオテクノロジー専攻
- 4) 教育分野より
 - APU 立命館アジア太平洋大学教授 Faezeh Mahichi ファエゼ・マヒチ
 - 学習塾・英会話教室主催 斉藤元子
- 5) 地域社会の環境保全のボランティア
 - 高橋正美さん
- 6) 消費者
 - 本ワークショップ参加者9名全員

研究と活動の成果

ワークショップでは各参加者から提示された現在の課題と今後の展望についてディスカッションを実施しました。

- 1) 環境、人間、自身と家族の健康を大事にするために互いがどのように協力し合い、ひとつの大きな輪を作っていくか。
- 2) ことなった状況・経歴をもつメンバーが互いを理解し助け合うにはどのような実践が必要か

生産者、事業者、消費者等の横のつながりを維持・発展させ、解決すべき課題を確認することで、現在よりもさらに広範囲に、また、より多くの消費者から認知を得ることができるよう、本ワークショップを継続していくことになりました。地域、有機農家、地元旅館、温泉、飲食店、企業等との連携を強化し、「健康食としての有機かつ地産地消」の認知度向上と普及を目指し、ツーリズムにおいて実践していく結論に達しました。

その他

本研究に付随して、マヒチ・ファエゼ Faezeh MAHICHI を研究代表者とする「地域、ローカル、グローバルな社会における包括的持続可能な開発のための教育フレームワークとしての草の根活動の可能性と課題の検証」 (<https://en.apu.ac.jp/cil/research/> 参照) という共同研究を行っています。

この研究の一環として、APU においておおいたオオガニックマーケットの後藤亜希子さんと神鳥農園の神鳥一・浩恵さん夫妻に講義を実施していただきました。https://en.apu.ac.jp/cil/news/article/?story_id=47)

ーティングの名称



Discussion in the afternoon 1
ディスカッション1



Discussion in the afternoon 2
ディスカッション2



Participants
ワークショップ参加者



Lunch prepared by organic food
有機素材を利用した昼食



Organic tea leaves from Oita Organic Market
おおいたオーガニックマーケットの有機茶葉



Organic Nabana & Watercress from Kandori Farm
神鳥農園の菜花とクレソン



生体防御機能における温泉微生物の効果

株式会社SARABiO温泉微生物研究所 中央研究所
宮田光義

要 旨

近年、新型コロナウイルス感染症が世界的に拡大していることから、ウイルスや病原菌に対する生体防御機能を高めることはますます重要度を増している。本研究では、生体防御に深く関連する粘膜上皮細胞を用いて、バリア機能およびウイルス感染に関する温泉藻類RG92の効果を検証した。RG92より得られた抽出エキス(RG92エキス)は、粘膜表面のバリア成分であるMUC2の遺伝子発現を増強した。さらに、同エキスは、炎症刺激によって増加した新型コロナウイルス感染誘導因子TMPRSS2の遺伝子発現を減少させた。以上の結果から、RG92は、粘膜のバリア機能を高めるとともに、ウイルス感染誘導因子を抑えることで、生体防御機能を高めることが示唆された。

1 はじめに

2019年12月に中国で新型コロナウイルスが発見されて以来、急速にその感染症が世界的に拡大している。世界保健機構や厚生労働省の発表によると、2021年12月の時点で、新型コロナウイルス感染者は世界で約2.7億人、日本国内で約170万人となっており、死者もそれぞれ約530万人、日本国内で約1.8万人となっている^{1, 2)}。ワクチンや新薬の開発が急速に進み、以前よりも新型コロナウイルス感染症の発症率や重症化率は抑えられているものの、新しい変異株が発見されるたび、その脅威に脅かされているのが現状である。また、基礎疾患や年齢、副反応等の理由により、ワクチン接種や新薬服用ができない場合があることを考えると、ウイルス等の異物の侵入を未然に防ぐことは非常に重要であると考えられる。

ウイルス侵入の予防において重要な役割を担っているものが、粘膜バリア因子とウイルス侵入誘導因子である。粘膜バリア因子の代表なものとして、ムチンがある。このバリア因子は粘性の高い糖タンパクの一種であり、粘膜表面を覆うことで物理的バリアを形成する。これにより、ウイルスなどの異物が粘膜細胞の表面に接触することを妨げる。また、代表的な新型コロナウイルス侵入誘導因子として、ACE2、TMPRSS2、FURINがある。ACE2は新型コロナウイルスのスパイクタンパクを認識して結合する受容体である³⁾。このウイルスがACE2に結合すると、TMPRSS2とFURINによってスパイクタンパクの一部が切断される。その結果、ウイルスと粘膜細胞の細胞膜が融合し、ウイルスが宿主細胞内に侵入する^{3, 4)}。したがって、ムチンを増加させる、あるいは、ウイルス侵入誘導因子を減らすことによ

り、ウイルス侵入を予防することができると考えられる。

私たちはこれまで別府温泉に生息する微細藻類の有効性について検証し、弊社で発見した別府温泉藻類RG92が、抗炎症・抗酸化・抗糖化作用を示すことを明らかにしてきた。これらの作用が、ムチンやウイルス侵入誘導因子の発現を制御することが知られている。そこで、今回は、粘膜上皮細胞を用いて、RG92より得られた抽出エキス(RG92エキス)による新型コロナウイルス侵入予防効果を検証した。

2 調査方法

ヒト腸管上皮細胞(LoVo)[理化学研究所バイオリソースセンター]を24ウェルプレートに 4×10^5 cells/wellで播種し、一晚37°C、5%CO₂条件下で静置した。ムチン(MUC2)の遺伝子発現を評価するために、2% RG92エキスで24時間処理をした。また、新型コロナウイルス侵入誘導因子の遺伝子発現を評価するために、1% RG92エキスで2時間前処理し、30 μ g/mL *E. coli*由来リポ多糖(LPS)で6時間刺激した。その後、500 μ L/well PBS(-)で洗浄し、ReliaPrep RNA Cell Miniprep System[プロメガ]を用いて、total RNAの回収・精製を行った。cDNA合成およびリアルタイムPCRはTHUNDERBIRD SYBR qPCR/RT Set II[東洋紡]を用いて行った。

3 結果及び考察

2% RG92エキスを処理すると、LoVo細胞におけるMUC2のmRNA発現量が10.4倍に増加した(図1A)。また、LPSをLoVo細胞に処理すると、TMPRSS2のmRNA発現量が有意に増加するが、1% RG92エキスを処理することにより、その発現量増加分を53.4%抑えた(図1B)。一方で、ACE2とFURINについては、RG92エキスの処理により有意な変化はみられなかった(delta not shown)。

MUC2の遺伝子発現はCDX, CREB, ATF-1, RAR α , SP1等の様々な転写因子によって制御されている⁵⁾。DNAマイクロアレイの解析でMUC2の遺伝子発現に関わる転写因子を調べたところ、RG92エキスは、これら転写因子発現の変動に影響を与えなかった。したがって、RG92エキスはこれら転写因子の遺伝子発現以外のメカニズムで、MUC2の遺伝子発現を制御しているものと考えられた。

一方、TMPRSS2は炎症のマスターレギュレーターとなる転写因子NF- κ Bを介して、その発現が亢進されることが知られている。以前の報告で、RG92エキスはROS-NF- κ Bを介して各種炎症性サイトカインの発現を抑えることを明らかにしている⁶⁾。今回の結果においても、RG92エキスがこの細胞内シグナル伝達を介してTMPRSS2の発現を抑制しているものと推察される。

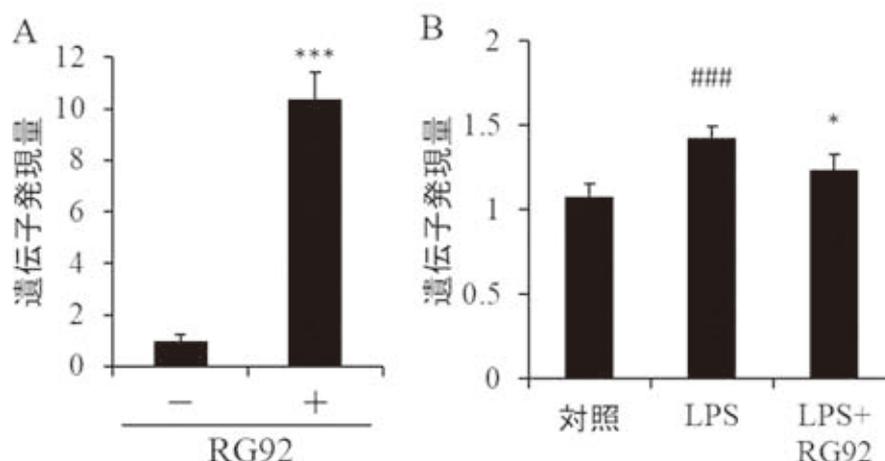


図1 RG92エキスが生体防御関連因子に対する効果

A) RG92がMUC2の発現に及ぼす影響 ***, $p < 0.005$ vs RG92 - (n=3).

B) RG92がTMPRSS2の発現に及ぼす影響 *, $p < 0.05$ vs LPS (n=3). ###, $p < 0.005$ vs 対照 (n=3).

4 まとめ

RG92エキスはMUC2の遺伝子発現を促進することで、粘膜バリア機能を高めることが示唆された。また、本エキスは、炎症ストレスにより増加したTMPRSS2の遺伝子発現を抑制することで、新型コロナウイルスの感染を予防する可能性が示唆された。結論として、RG92は、生体防御機能を高める素材として有望であると考えられる。

(参考文献)

- 1) <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>
- 2) <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kokunainohasseijoukyou.html>
- 3) Hoffmann M et al., SARS-CoV-2 Cell Entry Depends on ACE2 and TMPRSS2 and Is Blocked by a Clinically Proven Protease Inhibitor. *Cell*. 2020; 181(2):271-80
- 4) Paria K, Synergy of melanin and vitamin-D may play a fundamental role in preventing SARS-CoV-2 infections and halt COVID-19 by inactivating furin protease. *Transl Med Commun*. 2020;5(1):21.
- 5) Van Seuning I et al., Transcriptional Regulation of the 11p15 Mucin Genes. *Front Biosci*. 2001;6:D1216-34.
- 6) A Novel *Mucidosphaerium* sp. Downregulates Inflammatory Gene Expression in Skin and Articular Cells. *Altern Ther Health Med*. 2021;27(1):28-34.

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7月16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）

（令和4年4月11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	浜 田 み ほ	副 会 長
大分県生活環境部自然保護推進室 主幹（総括）	手 島 淳	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	
大分産業保健総合支援センター 総括・主幹相談員	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	牧 野 直 樹	理 事
九州大学 名誉教授	糸 井 龍 一	
九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 助教	松 本 光 央	
九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 教授	山 本 順 司	
九州大学病院別府病院 病院長	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 教授	楠 本 成 寿	
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 助教	澤 山 和 貴	
京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 研究員	齋 藤 圭	
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	
東海大学人文学部人文学科 学科長・教授	齊 藤 雅 樹	
広島大学先進理工系科学研究科地球惑星システム学プログラム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プログラム 特任准教授	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	
別府大学食物栄養科学部 研究員	西 田 友 美 子	
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）SARABio温泉微生物研究所 中央研究所 代表取締役会長	濱 田 茂	
（株）SARABio温泉微生物研究所 本社 事業開発チーム 主任	久 米 迪 子	
環境工研（株） 代表取締役	大 島 博	
九電産業（株） 環境部 取締役環境部長	田 尻 隆	
九電産業（株） 環境部 地熱グループマネージャー	渡 邊 英 樹	
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	
西日本技術開発株式会社 地熱業務本部 地熱部 部長	松 田 鉦 二	
日鉄鉦業(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) 探査部	長 谷 英 彰	
(有)サンエスマンテナンス 専務取締役	塩 見 泰 美	
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
白 杵 市 長	中 野 五 郎	
竹 田 市 長	土 居 昌 弘	理 事
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・産業部温泉課 課長	樋 田 英 彦	監 事
別府市観光・産業部温泉課 参事	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	羽 田 野 康 仁	
大分県衛生環境研究センター 所長	伊 東 成 巳	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)	岡 崎 嘉 彦	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主幹研究員	塚 本 伸 哉	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 主幹研究員	溝 腰 朗 人	
大分県衛生環境研究センター微生物担当 研究員	遠 藤 智 哉	
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 主任研究員	松 田 貴 志	
大分県衛生環境研究センター水質担当 研究員	佐 藤 寿 信	
大分県衛生環境研究センター水質担当 研究員	山 村 知 紗	
大分県衛生環境研究センター水質担当 研究員	尾 倉 奈 望	
大分県産業科学技術センター工業化学担当 主幹研究員	柳 明 洋	
大分県産業科学技術センター工業化学担当 研究員	秋 吉 貴 太	

(会員数 86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 主査	石 田 加 奈 子	
大分県生活環境部自然保護推進室 専門員	小 田 文 教	
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73号

令和4年8月 印刷
令和4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)
TEL 097-506-3025
FAX 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
TEL 097-551-8780

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。