

大分県温泉調査研究会報告

第 75 号

令和 6 年 8 月

目 次

大分平野の深層熱水型温泉に含まれるアンモニウムイオンの窒素同位体比 網 田 和 宏 他 3 人.....	(1)
別府鉄輪地区温泉水中のケイ酸の状態解析	江 藤 真由美..... (7)
日常的な単純泉あるいは塩化泉入浴の違いによる利用者の健康寿命推移進展の違い ー別府市および大分市を対象地区としてー	青 野 裕 士..... (15)
夜間の温泉利用と高齢者の血圧変化に関する検討	山 崎 聡..... (21)
大分平野の地下構造 (2) ー反射法地震探査ー	竹 村 恵 二 他 1 人..... (23)
大分市温泉分析データの時空間マッピング	澤 山 和 貴 他 2 人..... (37)
九重火山群の第四紀火山岩類の地球化学的研究 2	柴 田 知 之 他 6 人..... (49)
竹田市長湯温泉地域で採取された温泉水のSr同位体比	芳 川 雅 子 他 1 人..... (55)
別府温泉郷100年の発展と大分県内温泉地域とのかかわり ...	中 山 昭 則..... (61)
総括 新型コロナ感染流行は温泉入浴行動を変えたのか？ ー第 1 波から収束までの入浴行動の分析ー	加 藤 礼 識 他 4 人..... (71)
別府市内で発生した入浴中の緊急搬送数の分析 ー入浴中の体調不良につながるファクターの探求ー	阿 部 しず代 他 3 人..... (89)
地元のオーガニックで健康的な食事と別府温泉を楽しむ	マヒチ・ファエゼ..... (105)
温泉藻類RG92エキスが養殖ヒラメの健苗性に与える効果についての検討	野 畑 重 教..... (115)

序

平成10年7月から四半世紀の長きにわたり本研究会の会長を務めてこられた由佐悠紀先生（京都大学名誉教授）より、令和5年8月16日開催の総会の日から会長職を引き継ぎました。本研究会には京都大学理学部附属地球物理学研究施設に助手として採用された平成4年に入会しましたので、それから30年近くが経ちます。入会の際の会長は吉川恭三先生（平成10年6月4日に他界）であり、この私が吉川・由佐両先生の主宰してこられた京都大学の温泉科学分野を継いだ後任の教授であるということで、後継の会長に指名されたものと推察していますが、その理由はともかく、大役をおおせつかることになり身の引き締まる思いです。

平成13年からは理事となって本研究会の運営に関わりましたが、おりしも、本研究会の中核を担ってきた京都大学、九州大学、大分大学の国立大学は平成16年から法人化され、本研究会の運営も少なからず影響を受けることになり（少し具体的に言うと事務手続きに関わる場所です）、その対応に追われました。また、平成19年には大学の教員組織の整備として学校教育法が改正され、教育研究を職務とする助教授と助手の代わりにそれぞれ准教授、助教という職階が設けられるという改変が続き、それに同調するように大学等における研究のあり方についての意識改革が進みました。私はこれに共鳴した出来事だっただと思っていますが、論文形式で掲載される本調査研究会の報告に対して二重投稿疑惑がかけられるという事案が発生し、これについても然るべき対応が取られました。このように、由佐前会長は在任中に本研究会に押し寄せた難題をうまく乗り越えられましたが、未解決の問題も残されており、それにはこれからも真摯に取り組み続けたいといけません。

いくつかの未解決問題を会員諸氏と共有する端緒のきっかけにするために、以下に、由佐先生が本研究会の会長に就任した翌年に発行された本研究会報告第50号の序文から一部を再録します。

「本会の特徴の1つは、会員が多彩なこと（大学・行政機関の研究者・技術者と県市町村の実務担当者から成り、かつ、研究者の専門分野も地球科学・医学・法社会学とさまざまであること）ですが、もう1つの特徴は、調査研究課題のほとんどが研究者の自由な選択に任されていることでしょう。これが、本会を永続させてきた一因と思われます。しかし、反面、その学術性と専門性ゆえに、成果の地元社会への還元は、必ずしも十分でないように見えます。このことについては、すでに「30年のあゆみ」に当時の副会長・栗原県環境保健部長が指摘しておられ、第43号の序文では、故吉川恭三前会長がその反省に基づいて、業績内容の普及に努めることの重要性を説いておられます。〔改行〕本報告書が第50号の節目を迎えた今、温泉が私たちの生活と深く関わりあっていることに改めて思いをいたすとき、そうした方向への活動が、本会の今後のあり方の重要な側面になるであろうと考えております。」

取り上げる内容が前後しますが、「調査研究課題のほとんどが研究者の自由な選択に任されて、その学術性と専門性ゆえに成果の地元社会への還元は必ずしも十分でない」は、残念ながら十分に是正されたとは言えず、温泉行政上重要な調査研究課題を優遇する何かしらの方法について会員からアイデア

を募り、大分県を代表する温泉地を擁する地方自治体の首長も構成員となっている本研究会の理事会で対策を講じてはどうだろうかと考えているところです。また、「会員が多彩なこと」は依然として続いていて、民間の研究者・技術者も参画するようになり、会員の専門も生物学、人文地理学、社会科学といった分野にも拡大しています。従って、これは好機ととらえ、大分県温泉調査研究会の守備範囲を会員の専門分野の広がりに合わせて拡大させ、行政の関係部署との連携を検討してはどうだろうかとも思っています。

現実を見据えた本会のさらなる発展のために、会員の皆様のご理解と関係各位のなお一層のご協力をお願い申し上げます。

令和6(2024)年8月

大分県温泉調査研究会

会長 大 沢 信 二

大分平野の深層熱水型温泉に含まれる アンモニウムイオンの窒素同位体比

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

網田 和宏

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

大沢 信二・三島 壮智

山梨大学大学院国際流域環境研究センター

中村 高志

1. 研究の背景と目的

大分平野には深層熱水（吉川・北岡，1985）と呼ばれる，比較的深い井戸掘削（600m～800m）によって開発された温泉（以後，深層熱水型温泉と呼ぶ）が多数存在している．泉温 30℃～55℃のこれらの温泉は，ものによっては数 g/l にも達する多量の炭酸成分を含んでいることが特徴の一つであり，その起源については長らく地下深く埋没した地層の間隙水や地質時代の海侵期に地層中に取り込まれた海水（化石海水とも呼ばれる）であろうと考えられてきた．

このような考え方に対して，大沢（2001）は，深層熱水型温泉に含まれる炭酸成分の起源を明らかにすることを目的として，溶存全炭酸の炭素安定同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）と濃度および水質の関係について調査した．その結果，温泉の炭酸成分は深部に由来する CO_2 が堆積性有機物起源の CO_2 と様々な割合で混ざったものであることが示され，特に Na-Cl, HCO_3 型水質に分類される高塩分の熱水については，その炭酸成分のほとんどが深部起源 CO_2 に由来することを明らかにした．また，網田ほか（2005，2014）は，Cl 濃度が数千 mg/l 以上の深層熱水型温泉を主な対象として温泉水の採水を行い，主要化学組成，炭酸成分の炭素同位体比，He 同位体比，および水の水素・酸素安定同位体比などを測定した．その結果，He や炭素の同位体比がマントルと同等の値をもっていることや，水の同位体組成が天水に由来する水のもつ組成とは大きくかけ離れたものであることなど，深部に由来する流体の特徴を複数有していることを見出し，これらの深部由来の流体の起源が沈み込むプレートから脱水した変成流体である可能性について言及した．

以上の様に，大分平野の深層熱水型温泉の起源に関する情報を得るため，水の同位体組成や付随ガス成分に着目した調査や研究は行われており，一定の成果が得られてきた．その一方で，ほとんどの深層熱水型温泉に特徴的に含まれている成分の一つであるアンモニ

ウムイオンについては、その性状や挙動を理解するための十分なデータが得られていない状況にあった。

そこで本研究では、大分平野の深層熱水型温泉に含まれるアンモニウムイオンの窒素安定同位体比（以降は、アンモニア態窒素安定同位体比と呼ぶ）を測定し、その値の示す範囲やデータのもつ特徴や傾向などを明らかにすることで、本地域の深層熱水型温泉がもつ窒素に関する知見を得ることを主な目的とした。

2. 研究方法

現地調査は、2020年2月に行った。調査対象とした温泉は、主に温泉分析書を用いた文献調査によって選定し、塩化物イオン濃度が10,000 mg/Lを超えるものから、約1,000 mg/L程度のもので、様々な濃度を示す資料が得られるように考慮した。採水地点の位置を図1に示す。図中、No.01およびNo.11として記されている温泉については、過去、網田ほか（2005, 2014）によって調査されたことのある温泉を選定した。No.01については、プレート脱水流体の関与が示唆されている高塩分の深層熱水型温泉である。一方のNo.11については、過去の調査において付近を流れる川の河床に自然湧出していた温泉があったため、これを対象として採水を試みた地点である。今回の調査時には、河床が土砂の堆積により埋没してしまっており、温泉の湧出が確認できなかったことから、過去の採水地点近傍の道路脇の斜面より自然湧出していた水（鉄分を伴う赤水）を採水した。また、これらの温泉データと比較するための地下水や湧水の水質データを入手する目的で湧水（No.12）と井戸水（No.13）についても採水を行った。

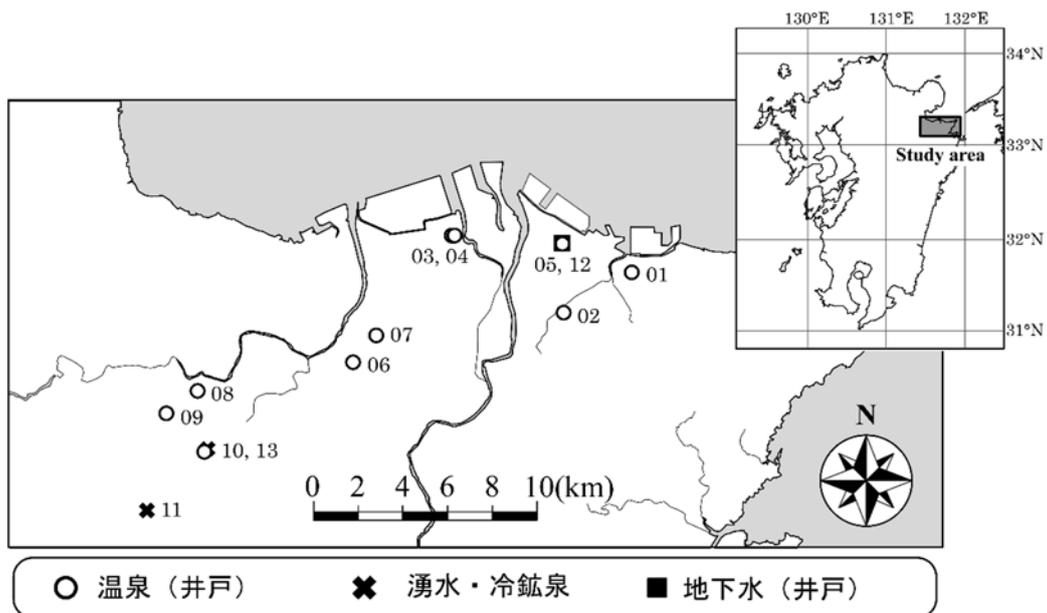


図1 採水地点位置図

現地では、水温、pH、電気伝導率（EC）、酸化還元電位などの測定を行い、水試料については分析項目に合わせて各種容器（ポリプロピレン製容器〔PP〕、ポリエチレン性容器〔PE〕、ガラスバイアル）に取り分けて実験室に持ち帰った。特にアンモニア態窒素安定同位体比測定用の試料に関しては、サンプリング後の生物活性による影響を排除するため、採水に際して $0.45\ \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過した試料水を PE 製容器に封入したのち、分析が行われる直前まで冷却・冷凍状態にて保管した。

アンモニア態窒素安定同位体比の測定にあたっては、溶存有機性窒素の分解による測定阻害が抑制できるアンモニア気散法（Cao *et al.*, 2018）を用いた。密閉したバイアル瓶内で試料水をアルカリ性にし、アンモニウムイオンをアンモニアガスとして気散させ、希硫酸で酸性にした濾紙へ回収したものを、元素分析系直結型安定同位体比質量分析計（Sercon 社製, ANCA-GSL with Hydra20-20）を用いて測定した。

3. 結果

得られた結果より、井戸の掘削深度（聞き取り調査で確認できたもののみ）、水温、pH、EC、塩化物イオン濃度およびアンモニア態窒素安定同位体比の測定結果について表 1 に示した。なお、No.12 の湧水については、アンモニウムイオンが検出されなかったため、アンモニア態窒素安定同位体比の測定も行われていない。本調査で得られた温泉については、水温が $27^{\circ}\text{C}\sim 52^{\circ}\text{C}$ 、塩化物イオン濃度が、 $2,200\sim 19,000\ \text{mg/L}$ 、pH も 1 例（NO.07）を除けば、全ての温泉で中性域の値が示されており、いずれも過去に大分平野の深層熱

表 1 深層熱水型温泉および地下水、冷鉱泉、湧水の水温、pH、EC、塩化物イオン濃度およびアンモニア態窒素安定同位体比

No.	Sampling date	Depth of well (m)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	pH	EC (S/m)	Cl ⁻ (mg/L)	$\delta^{15}\text{N}$ in NH_4 (%)
01	2020/2/27	--	42.0	6.7	5.2	19395	-2.2
02	2020/2/27	728	33.7	7.0	4.0	13154	-2.1
03	2020/2/27	--	52.4	7.1	1.5	4947	1.6
04	2020/2/27	--	50.2	7.3	1.4	4823	2.0
05	2020/2/28	800	49.4	7.0	2.0	5702	1.8
06	2020/2/28	800	38.0	7.8	0.86	2506	1.2
07	2020/2/28	800	44.7	8.2	0.92	2788	-0.4
08	2020/2/28	558	28.5	6.7	4.0	14787	-0.4
09	2020/2/28	700	44.8	6.8	1.4	3566	1.2
10	2020/2/28	800	26.9	6.8	2.0	6350	-2.6
11	2020/2/28	--	13.7	6.3	1.0	2285	-2.3
12	2020/2/28	--	16.5	7.9	0.02	4.0	--
13	2020/2/28	--	17.7	7.8	0.10	188	5.5

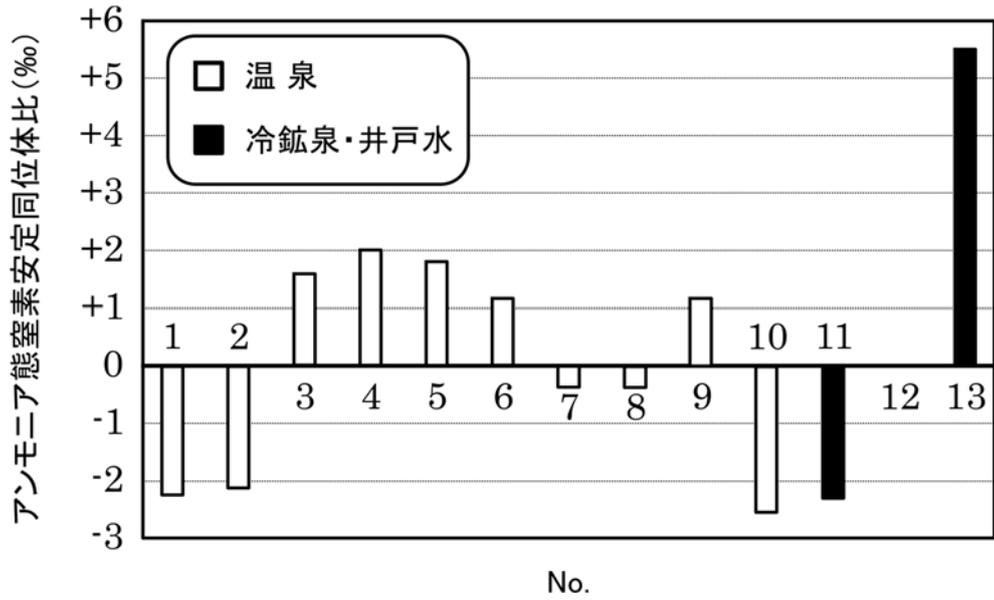


図2 各試料より得られたアンモニア態窒素安定同位体比

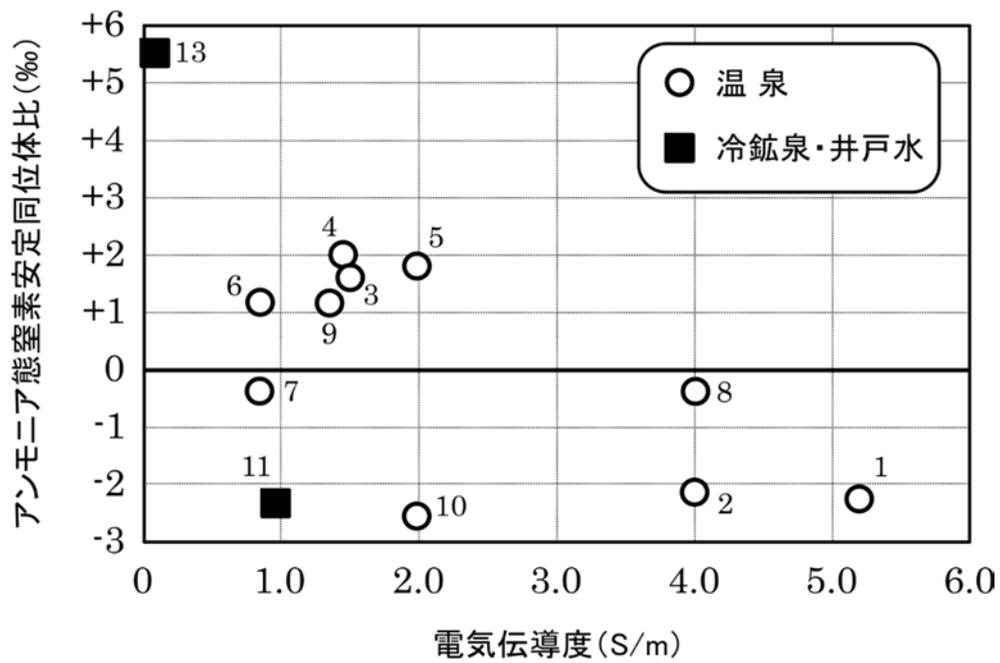


図3 電気伝導度とアンモニア態窒素安定同位体比の関係

水型温泉として報告されてきた温泉の範疇に収まるものであることが分かる。また、No.11 で採水した自然湧出泉については、溶存成分濃度が高い（EC：1.0 S/m, Cl 濃度：2,285 mg/L）ことから、冷鉱泉に分類される水であることが分かった。

図 2 に各地点で得られたアンモニア態窒素安定同位体比の値を棒グラフで示した。深層熱水型温泉のアンモニア態窒素の安定同位体比は、 $-2.6 \sim +2.0$ ‰の範囲の値をとった。冷鉱泉（No.11）に関しては -2.3 ‰となり温泉と同様な値を示したが、井戸水（No.13）については、 $+5.5$ ‰と温泉、冷鉱泉と比較して高い値をとった。図 3 には電気伝導度（EC）とアンモニア態窒素安定同位体比の関係を示した。最も電気伝導度の低い No.13 のプロットと、最も電気伝導度の高い No.1 のプロットを結ぶ線を引くとほぼすべてのプロットが線よりも左下側の領域に位置することが分かる。このことから、両者の間に線形の関係がある訳ではないものの、少なくとも塩分濃度の高い温泉では、窒素安定同位体比が高い値をとることが無い、というデータ間の特徴を有していることが示された。

4. まとめ

本調査では、大分平野の 10 地点において深層熱水型温泉の採水を実施し、温泉水に含まれるアンモニウムイオンの窒素安定同位体比の測定を実施した。その結果、本地域の深層熱水型温泉に含まれるアンモニア態窒素安定同位体比は、 $-2.6 \sim +2.0$ ‰の範囲の値をとり、地域の地下水（ $+5.5$ ‰）の値と比較して有意に低い値を示すことが明らかになった。また、電気伝導度の高い温泉ではアンモニア態窒素安定同位体比は高い値を示さず、塩分濃度との間に関連性があることも示唆された。

参考文献

- 網田和宏・大沢信二・杜建国・山田誠（2005）：大分平野の深部に賦存される有馬型熱水の起源，*温泉科学*，**55**（2），64-77.
- 網田和宏・大沢信二・西村光史・山田誠・三島壮智・風早康平・森川徳敏・平島崇男（2014）：中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源—プレート脱水流体起源の可能性についての水文化学的検討，*日本水文科学会誌*，**44**（1），17-38.
- 吉川恭三・北岡豪一（1985）：いわゆる深層熱水型温泉について，*大分県温泉調査研究会報告*，**36**，1-12.
- 大沢信二（2001）：大分平野に産する深層熱水中の炭酸成分の起源，*大分県温泉調査研究会報告*，**52**，21-26.
- Thi Thuy Hai Cao, Takashi Nakamura, Makoto Saiki, Thi Thao Ta, Tadashi Toyama, Kei Nishida（2018）：Effect of dissolved organic nitrogen contamination on $\delta^{15}\text{N-NH}_4$ determination in water samples by modification of the diffusion method with gas-phase trapping. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. DOI: 10.1002/rcm.8091

別府鉄輪地区温泉水中のケイ酸の状態解析

大分大学理工学部理工学科

江 藤 真由美

環境中でのケイ素の状態解析の一環として、メタケイ酸成分を豊富に含む別府鉄輪地区より pH の異なる熱水を採取し、その重合過程を観察した。今回は鉄輪地区の 4 カ所の地点より熱水(源泉もしくは、なるべく源泉に近い地点)を採取し、ラボにて重合挙動を観察、単量体ケイ酸種濃度と生成するポリケイ酸のサイズを追跡した。ケイ酸の重合仮定は、ラボ実験と同様に、pH に大きく依存し、中性付近の熱水ほど重合く、24-30 時間で非晶質シリカの溶解度付近まで濃度は低下し、生成したポリケイ酸は 10 nm 程度に成長していた。いずれの熱水試料でも単量体ケイ酸種が 100 ppm (Si)程度消費された時点で、3-5 nm 程度の粒子が観察された。

1. はじめに

ケイ素(Si)はクラーク数 2 番目の元素であり、環境水中では主にケイ酸($\text{Si}(\text{OH})_4$, モノケイ酸とも)の形で存在している¹⁾。温泉中には Si が豊富に含まれることは周知の事実であり、分析書ではメタケイ酸(H_2SiO_3)として表記される。地下より高温で湧出した熱水が、地表にて冷却もしくは溶媒蒸発等が起こることで、ケイ酸は過飽和状態となり、重合反応が進行しポリケイ酸を生成する。最終的にはシリカ(SiO_2)として沈殿したものが、シリカテラスやシリカスケールと呼ばれるものである。ケイ酸の重合過程は様々な因子に左右され、環境中でのケイ酸の物理化学の包括的な理解には、条件の異なる環境下でのケイ酸の重合過程の観察が重要となる。

別府温泉の鉄輪地区は、ケイ酸濃度が高いことで有名であり、地区内には、pH や溶存成分濃度(特にケイ酸の重合に影響しているとされる Na^+ 等)の異なる複数の温泉が存在し、環境中でのケイ酸の重合過程を追跡するのに好条件といえる。そこで本研究では、環境中でのケイ酸の物理化学の包括的な理解への第 1 段階として、鉄輪温泉地区に着目し、pH や Na^+ 濃度の異なる複数地点の熱水を採取、ケイ酸の重合過程の観察を行った。

2. 実験

2.1 試薬

実験に使用した試薬は特級もしくはそれに準ずるものとし、すべて富士フィルム和光純薬より購入、精製処理等せずに実験に用いた。試料の調製には、純水(ピュアライト PR- α , ORGANO)を用い、室温下にて処理を行った。pH の調整には、塩酸もしくは水酸化ナトリウム水溶液を用いた。

2.2 サンプルング

温泉水試料は表 1 に示す 4 カ所より採取した。熱水を採取後すぐに、定量ろ紙(5C), 次いで 0.45 μm メンブレンフィルター(DISMIC 25CS045AN, Advantec)を用いてろ過を行った。ケイ酸分析用の試料については、ろ過を行った後に、速やかに試料を pH 2 に固定した試料に加え、ろ過後に pH 処理を行わずに、保温容器に移し、ラボに持ち帰った 2 種類を用意した。熱水の pH, 温度は現地にて測定を行った。pH 電極(9625-10D, HORIBA)は使用温度範囲が 0 - 100 $^{\circ}\text{C}$ のものを使用した。また、採取時の温度を保った状態でのケイ酸の重合挙動を確認するために、温泉池もしくは貯槽タンクにポリ瓶を浸漬できる地点では、一定時間、温泉水中のケイ酸の重合挙動を現場にて観察した。

表 1 サンプルング地点と各地点でのサンプルング箇所

サンプルング箇所	
かまど地獄	源泉より3号池に注ぐライン
鬼山地獄	源泉より温泉池に注ぐライン
鉄輪むし湯	源泉から貯槽タンクへのライン
鉄輪旅館A	複数源泉の混合タンクライン

2.3 サンプルング試料の成分分析

モノケイ酸の分析は吸光度計を用いモリブデン黄法にて行った。本報告書では吸光度計で検出したものを Mo-reactive Si と表記した。全ケイ酸濃度は、試料を高アルカリ性条件下で一定時間加熱処理を行うことで、ポリケイ酸を分解させ、その後中和処理を行った後に ICP-AES にて測定を行った。溶液中のポリケイ酸濃度は全ケイ酸濃度から Mo-reactive Si 濃度を引くことで算出した。陽イオン、陰イオン分析はイオクロマトグラフィーを用いて行った。Al, Fe 等の金属イオン濃度は ICP-AES にて測定を行った。濃度測定には、多点検量線法を用い、一部試料は標準添加法にて測定を行った。

2.4 サンプルング試料の DLS 分析

動的光散乱法(Dynamic Light Scattering, DLS)は Malver Panalytical 社の Zeta Sizer ZS を用いて測定を行った。試料はすべて pH 2 に固定し、測定前に 0.45 μm メンブレンフィルターを用いてろ過を行った。すべての測定は 25 $^{\circ}\text{C}$ で行った。

3. 結果と考察

3.1 対象熱水の組成分析結果

表 2 には、各サンプルング地点より採取した熱水の性状分析結果を簡単にまとめた。今回採取した熱水の pH は 5 から 7 付近のもので、鉄輪旅館 A は他 3 地点と比較し、成分濃度が低めである。また、Al, Fe については、今回測定した限りでは、鉄輪むし湯と鬼山地獄のみ、

それぞれ 0.5 ppm 程度含まれていた。

続いて、表 3 には各サンプリング地点より採取した温泉水中の Mo-reactive Si 濃度と全ケイ酸濃度をまとめた。採取した熱水は、温度の低下や溶媒蒸発により過飽和状態となり、重合反応が進行する。よって、採取した時点でのケイ酸の状態をいかに保つかが重要である。ケイ酸の重合反応及び非晶質シリカの溶解反応は、pH に依存し、pH 2 では極端に反応が遅いことが知られている。よって、対象試料の pH を速やかに 2 に固定することで、採取した時点でのケイ酸の状態を約 48 時間、見かけ上保つことが可能である。今回表 3 に示した Si 濃度は上記の処理を行って分析を実施した結果である。

かまど地獄を除く 3 地点では、Mo-reactive Si 濃度と全ケイ酸濃度の差が最大でも 10 ppm 程度であり、熱水中でほぼ Mo-reactive Si すなわちモノケイ酸として存在していると推定された。実際、かまど地獄以外の地点より採取した熱水を DLS にて測定した場合、明確なピークが確認できなかった。このことからポリマー種が一定量存在している可能性は低い。一方のかまど地獄は、源泉より採取した熱水を DLS にて測定したところ、図 1 に示すように約 70 nm 付近を中心とした粒子が検出された。この粒子としては、ポリケイ酸もしくは湧出時に不純物として共存する鉱物のコロイド粒子等が考えられたため、 ζ 電位を測定した。pH 2 にて処理を行った溶液の ζ 電位はほぼ 0 であったことから、確認されたコロイド粒子はポリケイ酸由来と推定されるが、今後より詳細な確認が必要と思われる。

表 2 各サンプリング熱水の性状分析値
(*陽イオン, 陰イオン濃度は mg/L(ppm), 一部, 温泉分析書の値を使用)

	鬼山地獄	鉄輪むし湯	かまど地獄	鉄輪旅館A
pH	5.36	6.15	6.28	7.11
温度 / °C	81.5	91.0	79.8	77.0
陽イオン分析				
Na ⁺	1166.0	1104.1	1146.1	381.0
K ⁺	179.0	314.4	148.9	22.4
Ca ²⁺	36.5	34.9	44.8	36.6
陰イオン分析				
Cl ⁻	1835.0	1726.6	1881.0	295.0
SO ₄ ²⁻	343.0	348.5	277.8	432.0

表 3 各サンプリング熱水中のケイ酸濃度

サンプリング地点	Si濃度 / ppm	
	Mo-reactive Si	全ケイ酸
かまど地獄	215.6	249.0
鬼山地獄	240.7	252.4
鉄輪むし湯	239.3	254.2
鉄輪旅館A	203.4	204.5

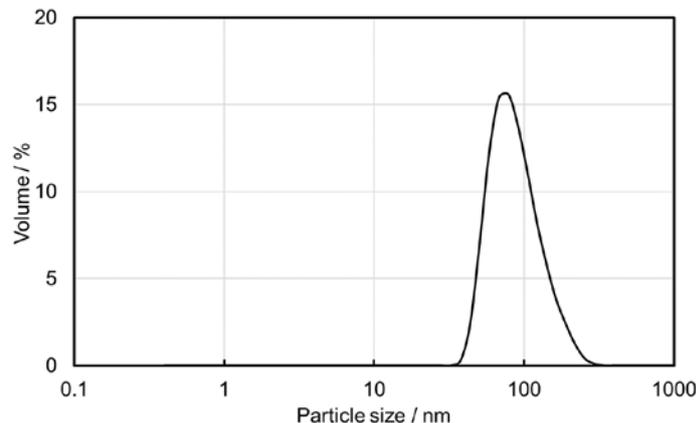


図 1 かまど地獄源泉付近より採取した熱水の DLS 測定結果

3.2 試料中のケイ酸の重合挙動

次いで、温泉池や配管等で熱水温度が低下した場合を想定して重合過程を観察した。持ち帰った熱水をラボにて一定時間放置し(温度のみ管理)、重合過程を観察した。採取後の熱水は約 5-6 時間後に 40 °C 付近まで下がり、8 時間経過時点で 25 - 30 °C となるようにすべての試料を調整して実験を行った。

ケイ酸の重合過程は、次の 3 段階に大きく分けられる。(1) モノケイ酸間の反応(M-M 反応)、(2) モノケイ酸とポリケイ酸間の反応(M-P 反応)、(3) ポリケイ酸間の反応(P-P 反応)^{2,3)}。今回は、M-M 反応と M-P 反応に使用されるモノケイ酸濃度の時間変化と、生成したポリケイ酸のサイズ変化を観察した。

図 2(a) には、ラボでの温泉水中のケイ酸の重合過程を示している。鉄輪旅館 A (●)では、急激に Mo-reactive Si 濃度が減少する一方、鬼山地獄(●)では、Mo-reactive Si の濃度変化は最も緩やかであった。各温泉水中の Mo-reactive Si の減少の程度は pH に依存しており、pH が中性付近の鉄輪旅館 A が最も早く、pH 5 付近の鬼山地獄が最も遅い結果となった。ケイ酸の重合には、Na⁺濃度も影響することはよく知られており、Na⁺濃度の増加と共に、モノケイ酸の減少が速くなる⁴⁾。今回の鉄輪旅館 A の Na⁺濃度は約 15 mM、他施設の Na⁺濃度が約 50 mM である。事前にラボにて上記濃度の NaCl を含む過飽和ケイ酸溶液でのケイ酸の重合過程を追跡した結果、極端な差は見られなかったことから、今回の温泉水の重合過程については、Na⁺濃度よりも pH の影響の方が大きく影響していることと推察される。

また、熱水試料の pH を 2 に固定した場合の Mo-reactive Si 濃度の推移を図 2(b)に示す。いずれの温泉池でも、重合過程の観察範囲では、pH 2 に固定した場合は、初期の Mo-reactive Si 濃度をほぼ保っていることを確認した。かまど地獄では、若干の濃度低下が確認されたが、これはすでに一定のポリケイ酸が存在していたため、ポリケイ酸とモノケイ酸の反応が進行した可能性が考えられる。

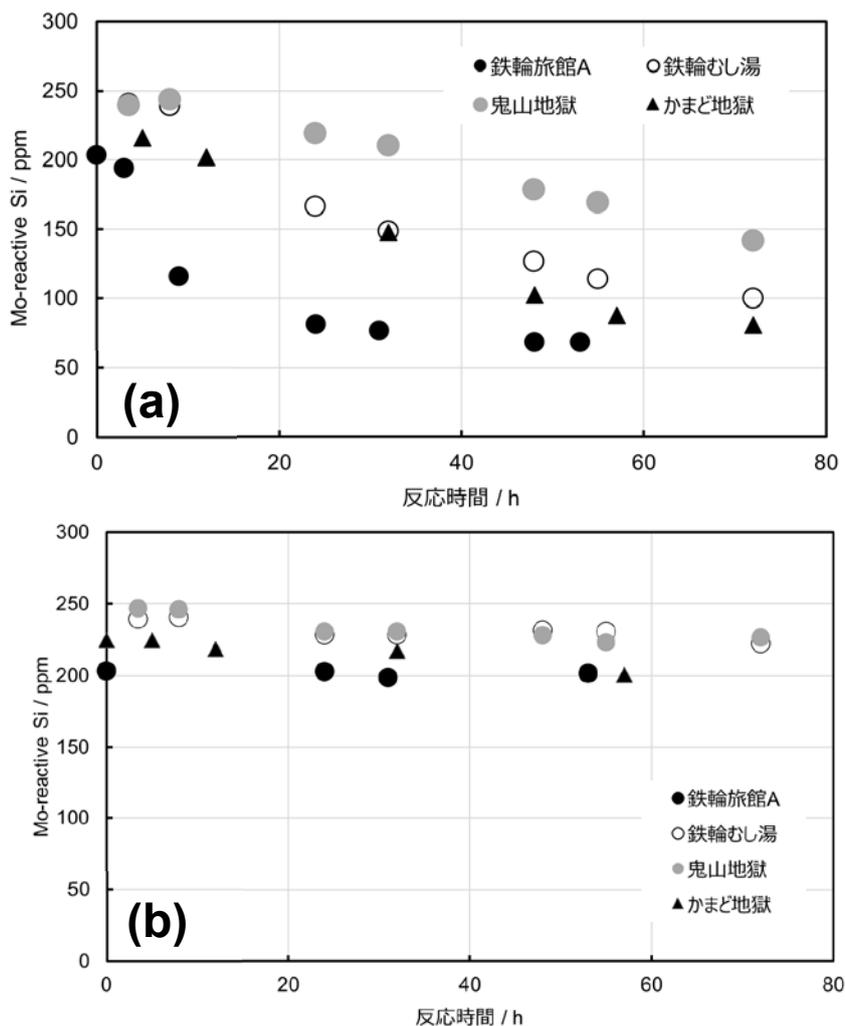


図 2 各サンプリング箇所から採取した熱水中の Mo-reactive Si 濃度の推移
 (a) pH 処理を行わなかった試料, (b) pH を 2 とした試料

3.3 温泉水中でのケイ酸の重合

最後に、重合時に生成するポリケイ酸の粒子サイズを DLS にて確認した。DLS では、生成したポリケイ酸の流体力学的半径を測定可能であり、ラボ実験や地熱熱水の分析で用いられた例がある⁵⁻⁷⁾。各熱水の重合過程により生成したポリケイ酸のサイズを DLS により測定した結果を図 3 に示す。かまど地獄については、源泉より採取した熱水自体にポリケイ酸が確認されたため、今回の DLS による測定は行わなかった。いずれの地点より採取した熱水についても、時間と共にポリケイ酸のサイズ変化が確認された。加えて、いずれの熱水においても、Mo-reactive Si が 100 ppm 程度消費された時点から 3-5 nm 程度の粒子が観察されていた。

鉄輪旅館 A が最もポリケイ酸の確認できる時間が早く約 9 時間後には、平均粒径とし

て、5.6 nm 程度の粒子が観察された。9 時間から 24 時間までの粒子変化は約 1 nm である一方、24 時間から 31 時間では 5 nm 程度成長していた。図 3(b)より、24 時間ですでにモノケイ酸濃度は平衡に達し始めているため、24 時間以降は P-P 反応が支配的に起こっていると推定される。

一方、他 2 地点では、粒子サイズの変化は旅館 A と比較し、穏やかであり、pH の低い鬼山地獄の方が成長は緩やかであった。鬼山地獄および鉄輪むし湯では、DLS の測定を行った時間範囲では、Mo-reactive 濃度は 100 ppm 以上であり、実験温度での非晶質シリカの溶解度の約 2 倍量である。よって、今回の測定範囲では、M-M 反応および M-P 反応が支配的に進行していると考えられる。

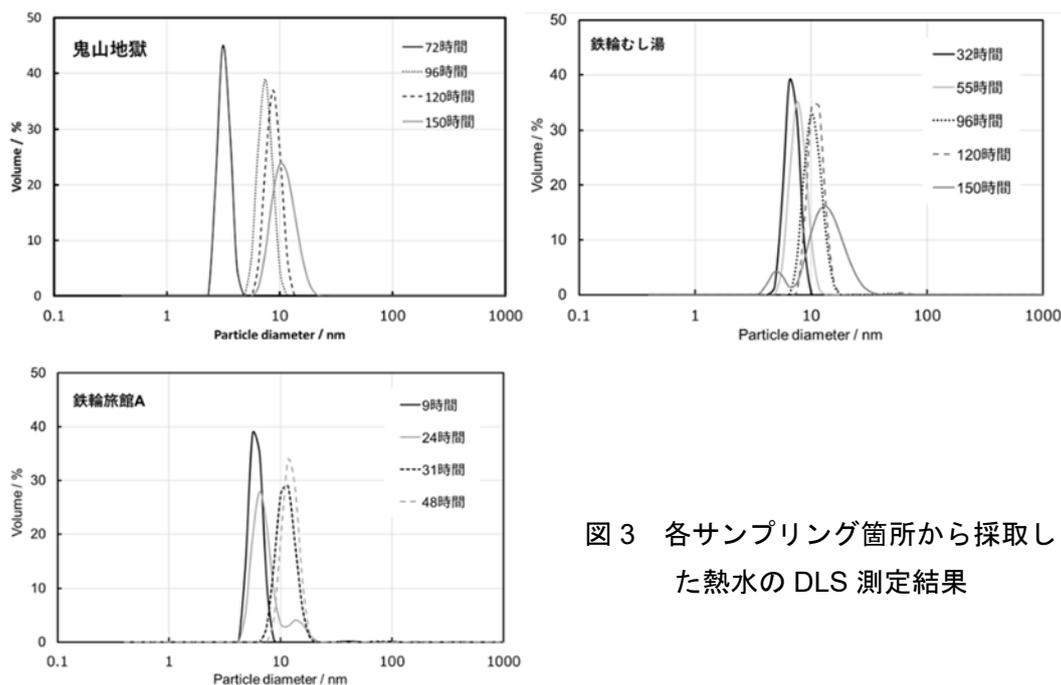


図 3 各サンプリング箇所から採取した熱水の DLS 測定結果

4. 結論と今後の予定

温泉水中のケイ酸の重合過程の理解のため、pH の異なる温泉水をラボにて重合させ、その挙動を観察した。重合挙動は熱水の pH に依存し、中性付近の熱水が最も Mo-reactive Si 濃度の減少が速かった。DLS によるポリケイ酸の粒子サイズの測定結果より、鉄輪旅館 A では、ポリケイ酸同士の反応による粒子成長を観察でき、他 2 カ所では、モノケイ酸の関与する重合過程を捉えていると考えられた。

今後の予定として、地点毎に生成したポリケイ酸を含む溶液を脱塩処理し、TEM でのポリケイ酸の観察を検討中である。可能であれば、生成したポリケイ酸を固定化し、²⁹Si MAS NMR 等での測定を試みる。加えて、DFT 計算を利用して生成したポリケイ酸がおおよそどの程度のクラスター構造を有するものかの知見を得たいと考えている。

5. 謝辞

サンプリングを快くお引き受けいただきました各施設の皆様にはこの場を借りてお礼を申し上げます。また、サンプリング及び分析には、大分大学工学部共創理工学科 井上・江藤研究室の学生にも参加いただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

サンプリング日時

- ・ 鉄輪旅館 A: 2023 年 3 月 6 日
- ・ 鬼山地獄, 鉄輪むし湯: 2023 年 3 月 7 日
- ・ かまど地獄: 2023 年 3 月 10 日, 8 月 2 日, 11 月 4 日(本報告書では, 11 月 4 日分を使用)

参考文献

- 1) R. K. Iler: “The Chemistry of Silica”, (1979), (John Wiley)
- 2) K. Shamada and T. Tarutani: “Gel chromatographic study of the polymerization of silicic acid”, *J. Chromatogr.* 168 (1979) 401 – 406.
- 3) T. Tarutani: “Polymerization of Silicic Acid A Review”, *Anal. Sci.* 5 (1989) 245 – 252.
- 4) 高橋 洋子, 横山 拓史, 樽谷 俊和: “ケイ酸の重合に及ぼす塩化ナトリウム濃度の影響”, *日本地熱学会誌* 10(3) (1988) 225 – 235.
- 5) E. Otsu, M. Etou, H. Ohashi, I. Nishida, S. Bai, Y. Okaue and T. Yokoyama: “Quantification Method of Size Distribution of Polysilicic Acid in Supersaturated Silicic Acid Solution”, *Anal. Sci.* 29 (2013) 333 – 337.
- 6) R. Tamura, H. Inoue, E. Hanajima, R. Ikeda, Y. Osaka, T. Yanaze, M. Kusakabe, K. Yonezu, T. Yokoyama, K. Tsukamoto, K. Marumo, A. Ueda: “In situ observations of silica nanoparticle growth in geothermal brine at the Sumikawa geothermal station, Japan, by dynamic light scattering”, *Geothermics* 77 (2019) 304 – 312.
- 7) V. V. Potapov, A. A. Cerdan, D. S. Gorev: “Silicic Acid Polymerization and SiO₂ Nanoparticle Growth in Hydrothermal Solution”, *Polymers* 14 (2022) 4044.

日常的な単純泉あるいは塩化泉入浴の違いによる 利用者の健康寿命推移進展の違い —別府市および大分市を対象地区として—

青野裕士労働衛生コンサルタント事務所

青野裕士

要旨

熱水流動・賦存の異なる別府市と大分市の単純泉（重碳酸塩泉）と塩化泉（Na 塩化泉）の入浴利用者を居住地で区分して、健康寿命を算出し、経年的な延伸を検討した。単純泉と Na 塩化泉区分で健康寿命に有意差はなく、両市全体を対象に解析した。市民の日常生活に制限のある期間の平均（平均寿命と健康寿命の差）は、2015 年から 2020 年の 6 年間で、別府市が、短縮していた。都市化と社会資本が進む大分市に比し、温泉場に恵まれ、均等な都市化で互恵的な社会資本が進む別府市では、より高い健康寿命の延伸が期待される。特に、70-74 歳階層の男性が、温泉入浴を含み、市民の社会参加活動に積極的に加わることは、介護予防の大きな鍵となって、健康寿命が延伸するばかりでなく、日常生活に制限を来たさない**自立期間**も長くなる可能性が示唆された。

1.はじめに

海底火山活動のみられる中央海嶺や火山性列島の周辺海域に分布する熱水の噴出場所で出来る「熱水鉱床」を源泉元とする別府市の温泉分布と、深海の水圧や地殻の圧力により極端な高圧・高温状態ができて噴出した熱水が押し寄せて大分平野を形作った太古の湖と堆積した地層にそって散在する熱水を温泉源とする大分市との温泉特性を、大きく単純泉（重碳酸塩泉）と塩化泉（Na 塩化泉）の分布する居住領域として分類し、泉質の違いによる平均寿命と健康寿命の差異の特徴を明らかにし、さらに、客体である居住者の人口を増やす目的で、大分市、別府市の全域から得られる、健康寿命および、最近の行政資料から得られる 18 市町村の社会生活指標の差異から大分市、別府市の特性、特に、65 歳以上の年齢層の健康づくりへの温泉の活用につき、記述疫学を行なった。

2.対象と方法

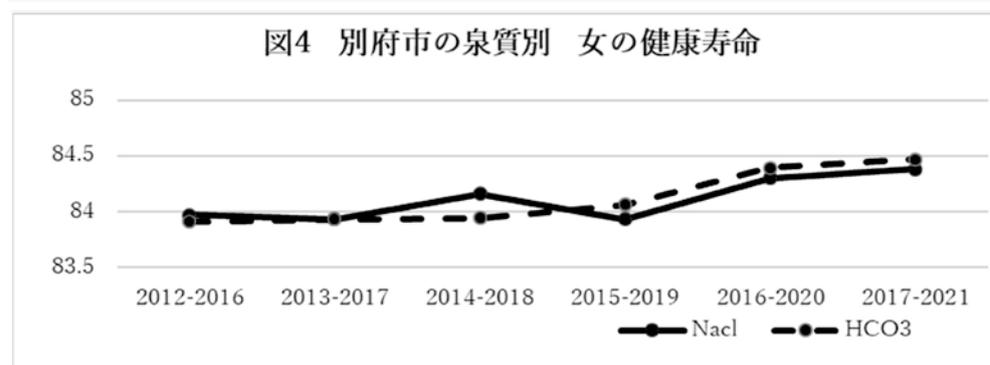
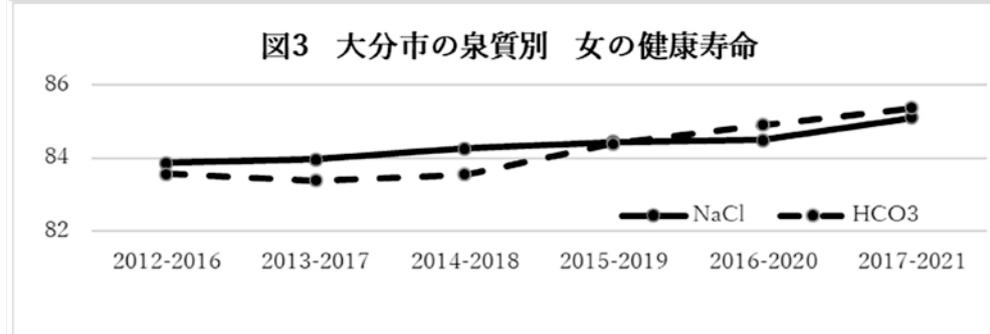
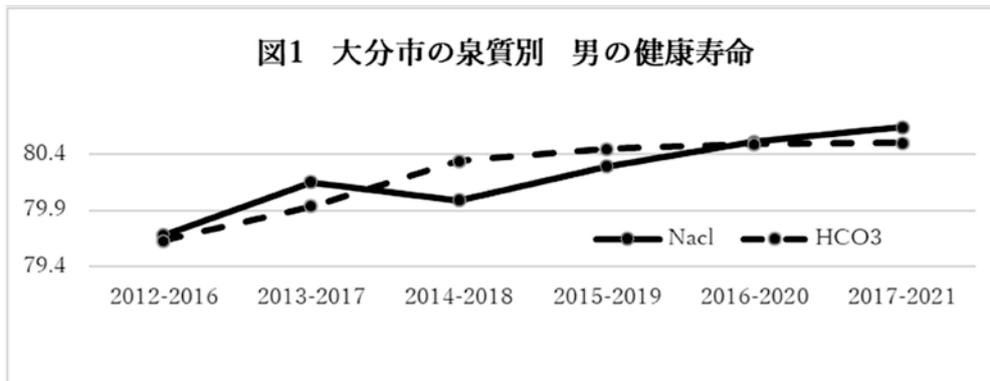
両泉質の分布される領域は、これまでに蓄積されている大分県の収集した温泉分析表を基に区分すると、別府市、大分市ともに小学校区にそって設立された自治区単位で得られるので、これらの単位で二分し、Na 塩化泉と重碳酸塩泉に類型して、厚労省の研究班の算出プログラムに従って健康寿命を算出した。性別・年齢階層別被介護保険認定者数が公開された 2014 年以降、2015 年、2016 年、2017 年、2018 年、2019 年、2020 年の 6 年の健康寿命を算出した。小学校区単位で、公開されている温泉分析表に基づき、泉質別に対象地区を区分した。別府市の Na 塩化泉の地域は、南立石、鶴見、亀川、朝日、緑丘、大平山、重碳酸塩泉の地域は、境川、南、上人、石垣、春木川、東山、別府中央、山の手で、健康寿命の算出に供した。大分市の Na 塩化泉には、長浜、中島、住吉、大道、豊府、南大分、滝尾、津留、東大分、日岡、桃園、鶴崎、別保、明治、東植田、宗方、鴛野、賀来、坂の市、丹生、重碳酸塩泉の地域には、金池、荷揚、春日、八幡、城南、荏隈、明野、松岡、川添、植田、大在とした。

大分市と別府市の男女別の健康寿命の年次推移を折れ線グラフで表示し、平均寿命と健康寿命の

差から得られる、日常生活に制限のある期間の平均の 2015 年~2020 年それぞれ算出して、大分市と別府市とで比較した。

さらに、2020 年の大分県 100 の指標から得られ、任意に 18 市町村の社会生活指標（宅地面積、男女各々の生産年齢人口割合、第 3 次産業/第 2 次産業比、県平均所得に対する各市町村所得の割合、事業所数、農業の法人化割合、人口密度、文化施設等の数、温泉源数、男女各々の高齢化率、男女各々の老年人口指数）を抽出した。介護保険受給の認定審査対象となる該当者の多くは、65 歳以上であるが、65~69 歳と 70~74 歳階層の人達が、積極的に身体活動などを行い、特定健診・特定指導にも主体的に参加して、健康づくりに励むことが、65~74 歳階層での要介護対象者の増減に影響するか、2020 年の 18 市町村から収集し関連を解析し図に表した。統計的解析には、Excel 表計算と SPBS ソフトを用いた。

3.結果



男女ともに、Na 塩化泉と重炭酸塩泉の健康寿命は、図 1,2,3,4 に示すように、2015 年から 2020 年まで、漸増しており、2015 年からの泉質の違いによる有意差は、見られなかった。そこで、以降の健康寿命および平均寿命と健康寿命の差すなわち、日常生活に制限のある期間の平均を、算出し、男女別に、大分市と別府市間で比較した。大分市と別府市と比べると、2015 年から 2020 年の 6 年間の健康寿命の変化は、

より延伸する傾向が見られた（図省略）

日常生活に制限のある期間の平均（平均寿命と健康寿命の差）は、2015年から2020年の6年間で、別府市の方が、短縮する傾向であった。即ち、図5のごとく、大分市と別府市との間で、有意差があり、平均値で見て、左側 女0.30年、右側 男0.11年と推定された。

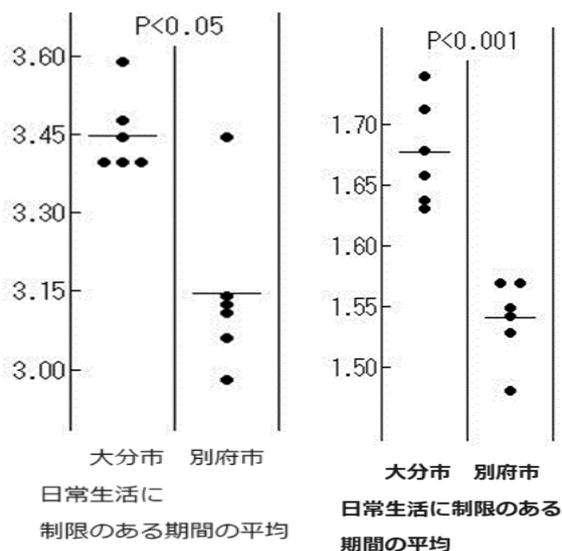
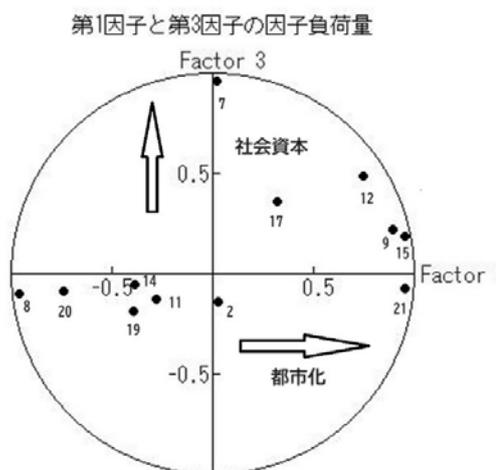


図5

但し、日常生活に制限のある期間から得られる2015年と2016年の間、2016年と2017年の間、2017年と2018年の間、2018年と2019年の間、2019年と2020年の5サンプルから推定できる日常生活行動における、日常生活に制限を来たさない自立期間は、大分市、別府市・男女ともに、延伸する傾向は見られなかった（図略）。

図6

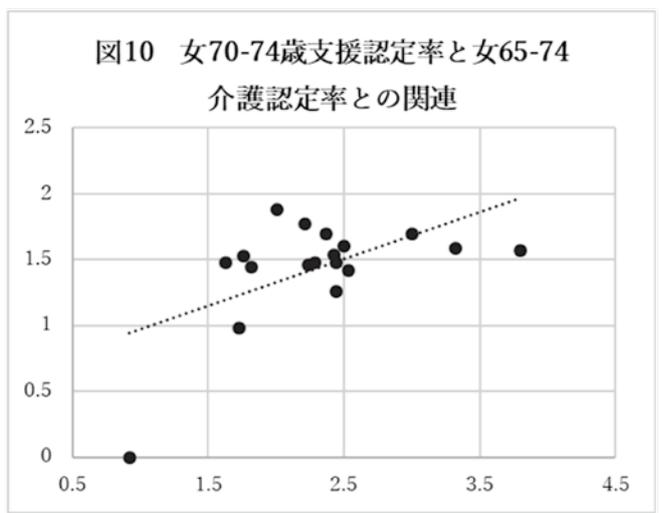
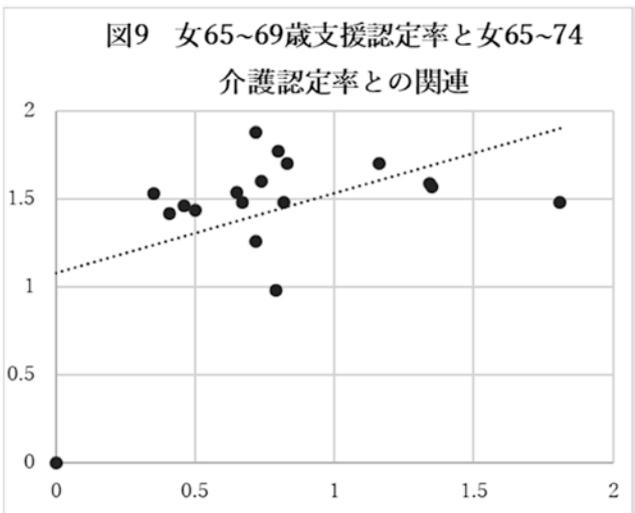
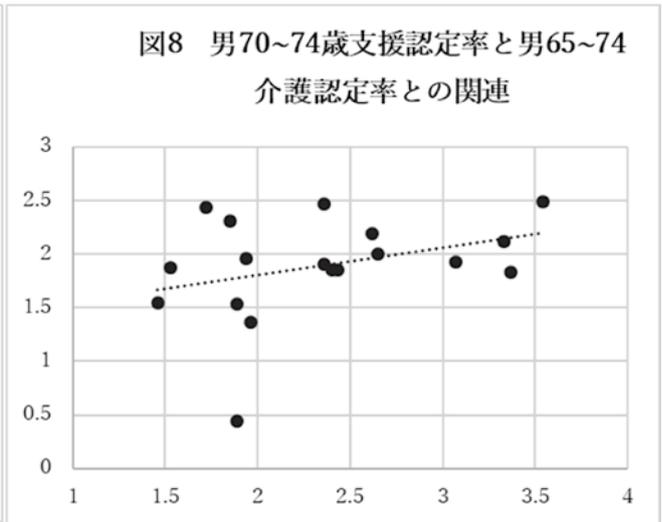
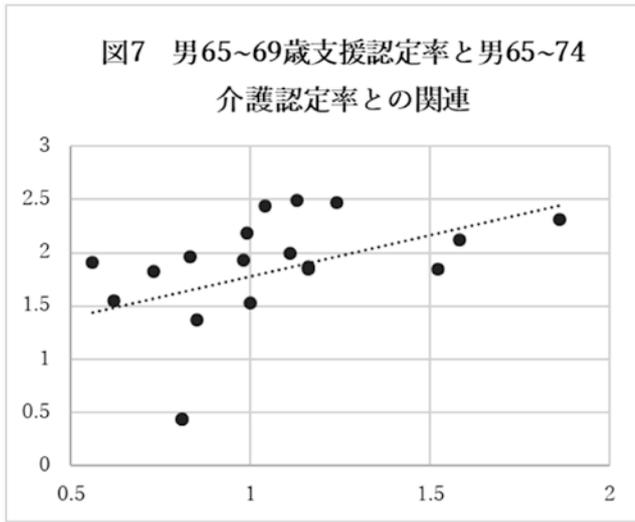


主成分分析の結果を、図6に示す。

因子得点より見ると、左四半分には、温泉源数（図6内番号11）、男女の老年人口指数（番号14）と老年化率（番号19）、第3次産業/第2次産業比（番号20）、文化施設等の数（番号8）が、位置づけられ、男女各々の生産年齢人口割合（番号7）、県平均所得に対する各市町村所得の割合（番号9）、事業所数（番号12）、農業の法人化割合（番号15）、人口密度（番号17）、宅地面積（番号21）、年平均気温（番号2）の因子得点より、これらの各社会生活指標が、右四半分に位置づけられた。

なお、主成分分析で、社会生活指標を抽出する上で、主観的要素を避けるため、さらに、社会生活指標に、交通事故発生件数、介護保険の一人当たりの給付費、従業者数（民営）も加えた相関関係を見たが、これらは、他の指標との関連が複合し、12の社会生活指標にしぼった。主成分分析の第1主成分、第2主成分、第3主成分の累積寄与率は、83.753%（ χ^2 検定 $p < 0.001$ ）であった。

これら社会生活指標の因子負荷量をもとに、推測すると、水平軸は都市化で、垂直軸は、社会資本の質的な乖離と推測された。



2000年の報告に基づき図に示すと、介護保険受給の認定要請が高くなる65~69歳と70~74歳階層支援対象者割合が、65~74歳階層介護対象者割合に影響するか、2020年の18市町村介護保険事業状況で、関連と回帰線を、図7,8,9,10に示すように比較したところ、図8は、他に比し、男の70-74歳階層の回帰線の傾きは小さかった。

4. 考察

別府扇状地における地下熱水の流路経路を、従来の見解に加え、2019年に発表された齋藤らの泉質分析からの経路解析では、それまでの経路に加え、Ca・Mg-CO₃型熱水の流動経路は、南部では、境川流域まで、北部では明礬温泉、照湯温泉西部まで、それぞれ延伸し、Na-Cl型熱水も南部において、境川上流域まで、それぞれ延伸していることも明らかにしている。忘れられて来た別府南浜の天然砂湯場への流路経路は、今日でも存在していることが推定され、また、別府市の現業、民間事業所、温泉組合等を介して、Na塩化泉の噴出量の多い西部一帯より東部に配湯されており、以前よりも、泉質の区別がつけがたい状況も生まれているのかも知れない。

さらに、大分市では、地下600~800メートルほどの水成の堆積層や堆積岩が厚く発達した平地部の深層に貯留する深層熱水が、大分平野を形成した古い湖へ押し寄せて、熱浴から熱を取り出す(ケルビンの原理)、あるいは、低温熱浴から熱を取り出し高温熱浴に移し、後に何も変化が残らないかのようにはできず、熱は高温から低温に流れ、その逆は自然には起こらないので(クラウジウスの原理)、散在する熱エネルギーが、大分市の温泉源につながっていると思われる。その証拠に、塚野、

竹矢、廻栖野で湧出される Na 塩化泉は、水温が 20°C前後であるが、大分平野の中部付近、すなわち、野津原を流れる七瀬川から大分川西側一帯には、Na 塩化泉と重炭酸塩泉の熱水がほぼ並走し、高温の温泉源が海浜へ向けて確保されている。さらに、この重炭酸塩泉の流動が、植物の光合成の促進に寄与している可能性が推測できる。すなわち、温泉中の炭酸から H^+ と HCO_3^+ のそれぞれのイオンが分離して、二酸化炭素が増え、一方、遊離した水素イオンの増加は、温泉水の pH が高めて、モール泉が、海浜に流れる途中の、六坊北町や王子中町で湧出しており、大分川以西の北部では、随時の、重炭酸塩泉と Na 塩化泉の流動経路の接触が推測される。行政区割での、泉質の 2 つ類型区分の判断は、容易なことではなかった。また、都市間の比較で、健康寿命の年次推移等への、泉質の違いの影響は見られなかった。温泉源の豊富な大分県では、健康づくりに、温泉入浴を優先して活用しており、交通の利便性が高まり、居住地以外の温泉地にも頻繁に出かけている影響も考えられる。健康寿命の延伸には、介護予防・健康づくりの推進が大きく関わっており、高齢化がすすむ地域にあっては、地域包括ケアシステムの効率的な深化だけでなく、地域のつながりが、大いに推進される必要がある。主成分分析から、X 軸方向のプラス方向には、均等から均衡の都市化、Y 軸方向には、互恵的なから公共的な社会資本優位な都市像の拡がりとして位置づけられ、別府市は、均等で互恵的な側面が、大分市は、均衡で公共的な側面が大きいと思われる。介護保険受給時の 65~69 歳と 70~74 歳階層人口の割合が、65~74 歳介護対象者割合に影響するか、比較したところ、男の 70~74 歳階層人口の割合に対し、65-74 歳階層介護の回帰線の傾きは小さく、男では、65-69 歳から 70-74 歳に年齢階層が上がる中で、介護予防・健康づくりのサービスの利用が減少しているとも思われる。均等で互恵的な別府市では、温泉を気軽に利用できる条件が整っていて、介護保険の給付を越えて、温泉が健康づくりに大いに活用されて来たと思われる。温泉入浴は、日常生活習慣のひとつであり、温泉場での交流が、社会参加活動を促し、地域の健康づくりに繋がっている。

文献

健康寿命の算定プログラム 2010-2022 年 <http://toukei.umin.jp/kenkoujyumyou/>厚生労働省科学研究

大分県生活環境部自然保護推進室 大分県温泉調査報告;温泉分析書 大分鉱泉集 2006 大分鉱泉集 2020

由佐悠紀 温泉の流動と賦存 温泉開発の影響に関する考察 温泉科学 37,161-168.

大沢信夫 由佐悠紀 北岡豪一 (1994) 別府南部における温泉水の流路経路 温泉科学 44,161-168.

齋藤 圭 三島壮智 大沢信二 (2023) 別府市における 2019 年の温泉泉質データに基づく地下熱水流動経路の推定 大分県温泉調査研究会報告 74,31-41.

平野芳弘 清野聡子 宇多高明 (2001) 古い映像資料に基づく海岸利用形態の復元;海洋性温泉都市の写真資料を読み解く 海洋開発論文集 17,475-480.

野田徹郎 北岡豪一(1981) 大分川流域の継続観測の総括 大分県温泉調査研究会報告 32,43-55.

野田徹郎(1981) 大分市内温泉の化学的特性 大分県温泉調査研究会報告 32,71-74.

夜間の温泉利用と高齢者の血圧変化に関する検討

九州大学病院別府病院・免疫・血液・代謝内科 講師

山崎 聡

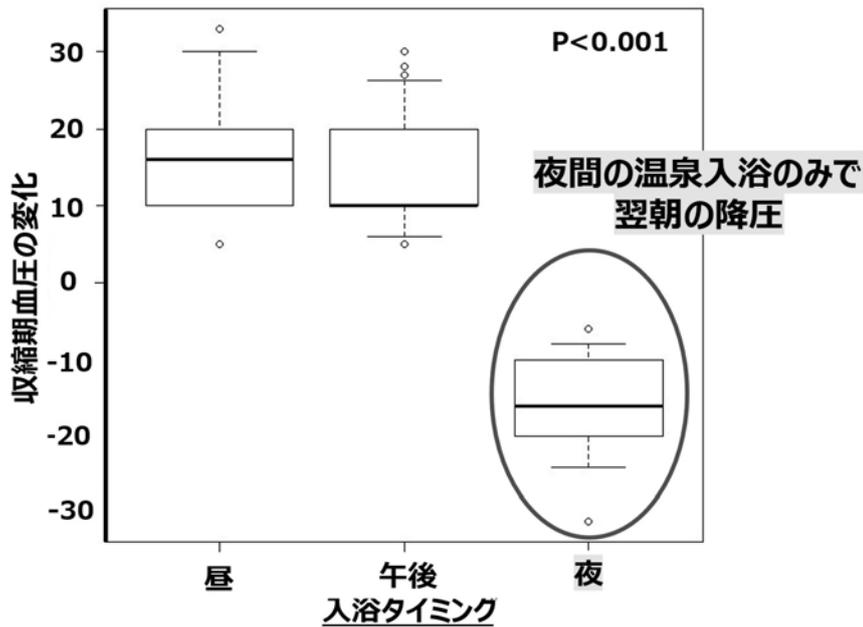
【1. 目的】65歳以上の大分県別府市民1万人以上に対するアンケートを実施し、高血圧の既往の少なさに夜間の温泉利用・うつの既往の少なさに毎日の温泉利用が関連していることを見出し論文公開した (Yamasaki S et al. Sci Rep. 2022;12:19462. Yamasaki S et al. Complementary Therapies in Medicine. 2023;72:102909.)。

夜間の温泉習慣は慢性ストレスによる睡眠障害の改善につながり高齢者の高血圧予防に有益となっている可能性がある。温泉の有効な利用により高齢者の高血圧発症の抑制に役立つことが期待される。本研究の目的は入浴時間による血圧変化の実情について検討することである。

【2. 方法】計画的な無作為比較試験の実施が必要だが、試験実行のための費用や研究体制の確立が必要である。本検討は2021年12月から2022年11月まで九州大学病院別府病院 内科に入院し、独歩可能、入院治療の影響が少ない時期に3回以上温泉入浴を利用した患者の温泉入浴の前日朝と翌日朝の血圧の変化を後方視的に確認した。

【3. 結果】九州大学病院別府病院内科に入院し、温泉入浴を利用した患者計99人を対象に入浴時間別で血圧に変化があるのかを調べた。入浴時間は昼(12時～13時)、午後(13時～18時)、夜(19時～20時)で比べ、血圧はまず入浴前の朝に測定した。夜に入浴した患者は昼や午後に入浴した患者と比べて、翌朝の血管収縮期の血圧が低下した(Yamasaki et al. Geriatrics 2024;9:2)。

入浴前後の収縮期血圧の変化 : 入院99人、朝食後血圧



Yamasaki et al. Geriatrics 2024.

【4. 考察】高血圧の患者に対し「高血圧の温泉療法プログラム」を確立する目的で臨床第 II 相試験を企画し参加募集を開始し、一般の温泉客に対し夜間の最高血圧時の収縮期血圧160mmHg 以上または拡張期血圧100mmHg 以上の事故が多いことが判明している不適切な温泉利用を防ぐために「夜間の温泉利用と血圧変化に関する検討」を開始し論文投稿している。

【5. 文献】

1. **Yamasaki S**, Tokunou T, Maeda T, Horiuchi T. Hot spring bathing is associated with a lower prevalence of hypertension among Japanese older adults: a cross-sectional study in Beppu. *Sci Rep.* 2022;12:19462.
2. **Yamasaki S**, Maeda T, Horiuchi T. Association between habitual hot spring bathing and depression in Japanese older adults: A retrospective study in Beppu. *Complementary Therapies in Medicine.* 2023;72:102909.
3. **Yamasaki S**, Tokunou T, Maeda T, Horiuchi T. Night-Time Hot Spring Bathing Is Associated with a Lower Systolic Blood Pressure among Japanese Older Adults: A Single-Institution Retrospective Cohort Study. *Geriatrics* 2024;9:2.

大分平野の地下構造（2）

－反射法地震探査－

京都大学

竹村 恵二・楠本 成寿

摘要

大分平野下の温泉・地熱等の利活用を考察する上で、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的・地質学的観点から推定される地下構造に関する形成過程や物性的な情報の整理が重要である。今回は大分平野で実施された地下構造推定のための物理探査の例として、特に、大分川および大野川の南北の測線、海岸に平行に実施された反射法地震探査結果からの地下物性構造についてまとめた。

はじめに

現在の地質学的知見から、大分平野の地下に分布する可能性のある地層群として、下位から、花崗岩類や結晶片岩類、大野川層群、豊肥火山活動の火山岩類および堆積岩類と最近の段丘堆積物や沖積層が挙げられる。別府湾の形成に関連した断層活動などによって、これらの地層がどのような深さでどのような分布をするかを種々の地球科学的探査の成果をまとめて、大分平野の地下構造を想定する研究の継続が必要である（竹村・楠本、2023）。大分平野域での地球物理学的調査として、重力探査、反射法地震探査、レーダー探査等が実施されてきた。本報告では、大分川および大野川の南北方向や、海岸に平行、すなわち東西方向に実施された反射法地震探査から推定された地下構造と地下地質との対応について議論し、別府湾堆積盆地の一部としての大分平野と別府湾域の関係も議論した。

反射法地震探査とは

人工地震発振による調査では、屈折法地震探査や反射法地震探査がよく採用される。地震波伝播速度と密度の積である音響インピーダンスが異なる媒質が接していると、その境界面で地震波は反射・屈折する。この境界面で反射して地表に戻ってきた波を用いて地層境界面の位置と形状を探査する手法のことを反射法地震探査という。反射法地震探査は比較的深部の水平層構造の探査に向いているため、これまで石油や天然ガス等、資源探査によく採用されてきた。近年は、比較的浅部の構造探査にも用いられるようになってきている。目的の探査深度や媒質に応じて、爆薬やバイブレータ、エアガンなどの震源を準備する。

大分平野域および別府湾周辺域の反射法探査

大分平野地域の地下構造解釈には、別府湾における由佐ほか（1992）などの情報とテクトニクスの解釈（Itoh *et al.*, 1998, 2014; Takemura *et al.*, 1994; 竹村, 2019; Itoh *et al.*, 2014; Itoh *et al.*, 2023 など）が有用であり、海域をふくめた基盤岩類を含む地下構造が推定されている。大分平野の詳細は、大分川測線、大野川測線、および海岸に平行にとられた3測線の成果が重要である。本報告では、大分県が実施した大分川左岸パイプロサイズ調査調査測線（測線長 3.0 km）（大分県, 1999）と大野川右岸パイプロサイズ調査調査測線（測線長 5.4 km）（大分県, 2001）、および2007年度に（独）産業技術総合研究所によって各測線の南部延長位置において反射法地震探査データが取得されているので、その結果も含めて再解析された結果および2017年大分平野で実施した海岸に平行な東西方向の地質構造調査結果を紹介する。

再解析および2017年大分平野で実施した海岸に平行な東西方向の地質構造調査は、（株）地球科学総合研究所により、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」（平成26年度～28年度）の一環として実施された（文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017）。図1に再解析された反射法地震探査断面位置を示す。

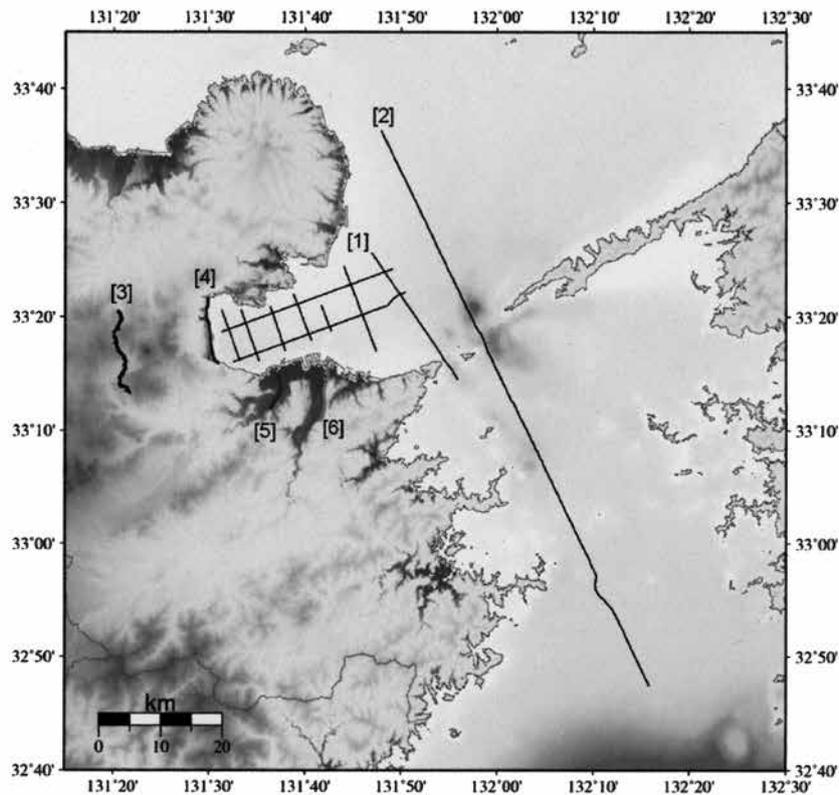


図1 大分平野と別府扇状地および別府湾再解析対象調査測線図（文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科（2015）

- [1] 京都大学理学部 1988 年度 別府湾地質構造探査(伊予灘地質構造探査を含む)
調査測線. 10 測線, 総測線長 142.5km
- [2] 京都大学理学部 1990 年度 豊後水道地質構造探査
調査測線. 1 測線, 測線長 100km
- [3] 京都大学理学部 1994 年度 由布院盆地バイプロサイス調査
調査測線. 1 測線, 測線長 18.8km
- [4] 京都大学理学部 1989 年度 別府陸域バイプロサイス調査
調査測線. 1 測線, 測線長 11.0km
- [5] 大分県(文部科学省地震関係基礎調査) 1999 年度 大分川左岸バイプロサイス調査
調査測線. 1 測線, 測線長 3.0km
- [6] 大分県(文部科学省地震関係基礎調査) 2001 年度 大野川右岸バイプロサイス調査
調査測線. 1 測線, 測線長 5.4km

上記解析対象の内、大分川左岸バイプロサイス調査及び大野川右岸バイプロサイス調査に関しては、2007 年度に(独)産業技術総合研究所によって各測線の南部延長位置において反射法地震探査データが取得されている。これらの探査測線は、大分川左岸で 4.3km(豊肥本線鉄道橋-七瀬川合流点)、大野川右岸で 5.3km(新殿-杵河内)であり、堆積平野の基本構造と主要断層群の詳細構造把握に資する目的で、解析対象に加えることとした。

・1999 年度実施の大分川測線の再解析結果

大分平野大野川及び大分川周辺における既存データに関して、まず調査測線及びデータ取得仕様の概要を記述する。図 2 に探査測線を示す。大分川測線は図 2 の西側部分、大分川に沿って示された測線である。1999 年度に実施された大分県(文部科学省地震関係基礎調査交付金調査, 大分県, 1999)による大分川左岸地下構造調査の南部延長部(豊肥鉄道鉄道橋-七瀬川合流点)においては、(独)産業技術総合研究所によってバイプロサイス探査データが取得されている(吉見ほか, 2008)。両機関による構造探査データに関しては、約 500m の重複区間が設定され、統合探査結果として反射法地震探査データ解析が可能であり、統合測線長は大分川左岸測線に関しては約 7.1km である。調査地域は、大分平野の市街地に位置するため、大型バイブレータ 1 台による稠密発震点確保及びノイズ環境を考慮して、河川敷周辺に設定された。受振点及び発震点間隔は、各々、標準 20m 及び 10m であった。大分県-産業総合技術研究所の測線接続箇所 500m 区間においては、重合数低減と共に、最大オフセットが 1000m まで低下し、三波川変成岩相当の基盤に関係する構造に影響が生じた。本測線では保安要件が確保できることを前提にバイブレータ台数及び発震エネルギーの調整を行った。これらの調整を踏まえて最大限の発震点が設定され、調査測線全域に互って稠密発震点が確保された。本測線データの再解析作業では、各種ノイズ抑制処

理を経て、' Multi-Dip' 型 CRS (MDRS) 処理を適用した。この処理により、当該地域における三波川変成岩帯及び領家帯花崗岩基盤の構造解釈に資する深部反射波列の抽出が可能となった (図 3)。

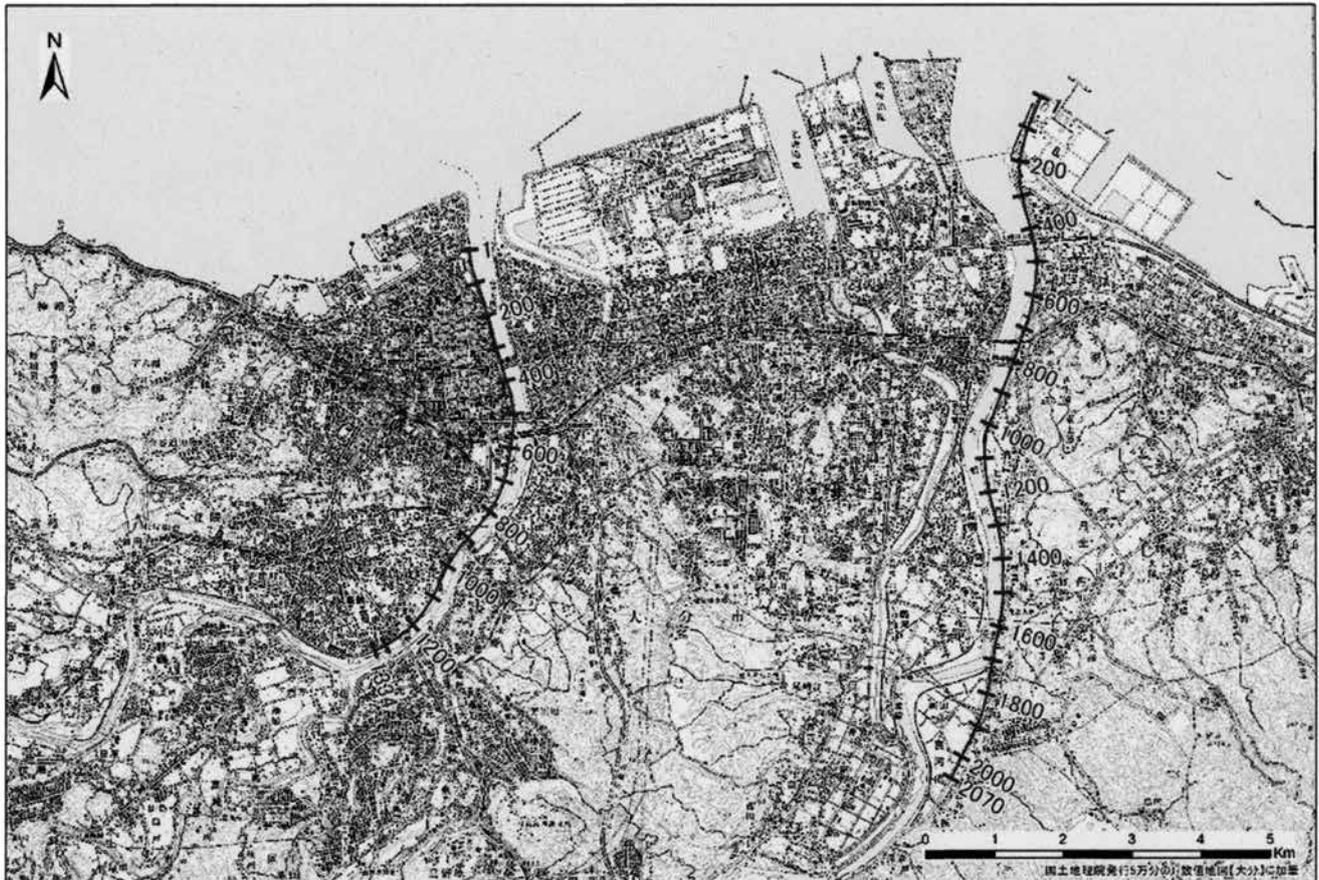


図2 大分川-大野川バイブロサイズ調査 調査測線図(CMP 重合測線位置図) (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2015))

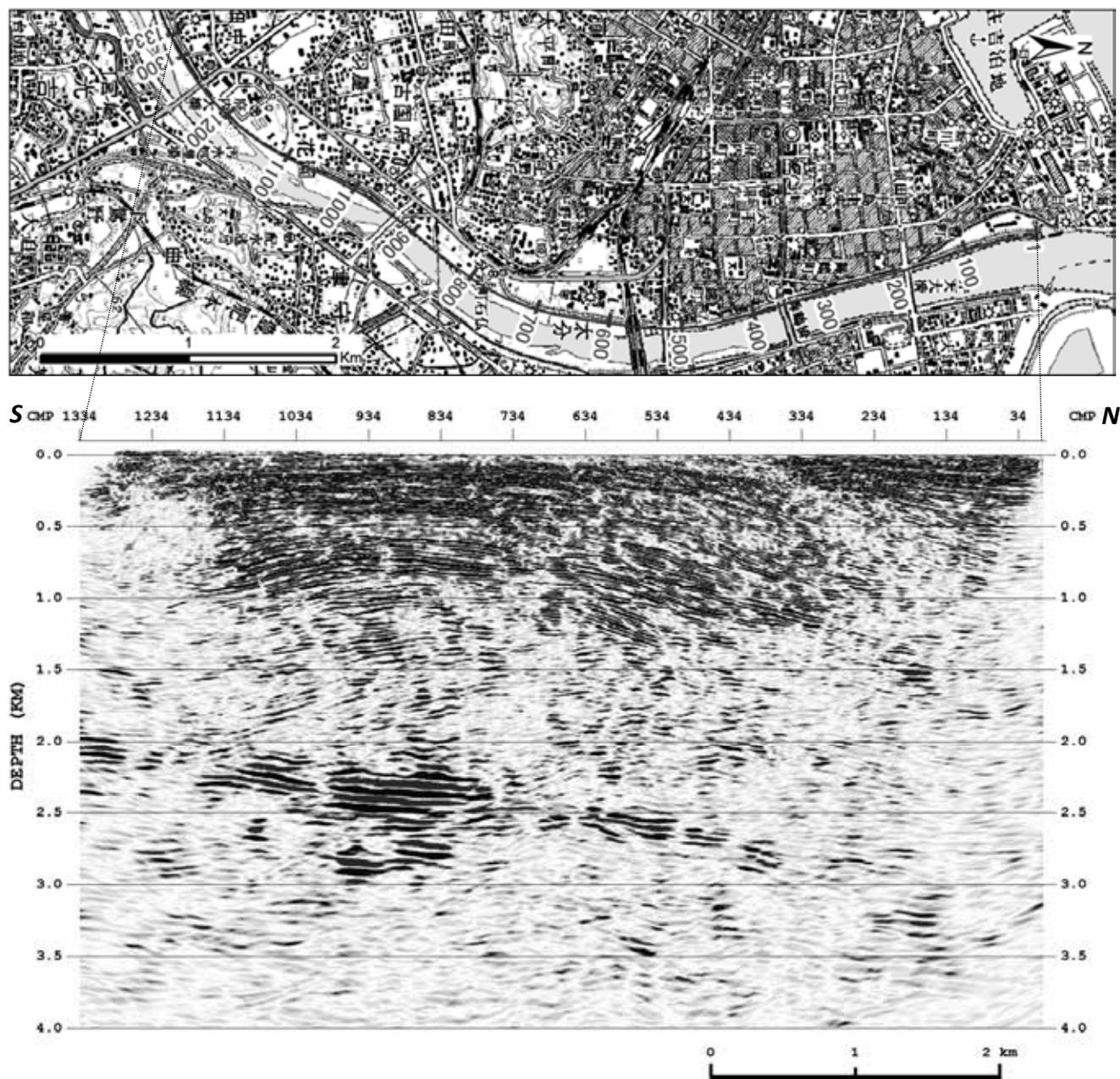


図3 大分平野大分川バイプロサイズ(1999 大分県+2007 産総研) 新規再解析結果 MDRS 処理重合後マイグレーション深度断面図 (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2015))

・2001年実施の大野川測線の探査結果

大野川測線は、図2の東側部分、大野川に沿って示された測線である。2001年度に実施された大分県(文部科学省地震関係基礎調査交付金調査, 大分県, 2001)による大野川右岸地下構造調査の南部延長部(新殿-杵河内)において、(独)産業技術総合研究所によってバイプロサイズ探査データが取得されている(吉見ほか, 2008)。両機関による構造探査データに関しては、約500mの重複区間が設定され、統合探査結果として反射法地震探査データ解析が可能であり、大野川右岸測線に関しては約10.4kmである。調査地域は、大分平野の市街地に位置するため、大型バイブレータ1台による稠密発震点確保及びノイズ環境を考慮して、河川敷周辺に設定され、受振点及び発震点間隔は、各々、標準20m及び

10mであった。大野川においても、大分県-産業総合技術研究所の測線接続箇所 500m 区間においては、重合数低減と共に、最大オフセットが 1000m まで低下し、三波川変成岩相当の基盤に係る構造に影響が生じた。また、本測線の地下構造調査では、発震点に対して受振展開が北側に設定されたため、北傾斜反射面の抽出精度が一部低下してしまった。

本測線データに関する再解析作業でも、各種ノイズ抑制処理を経て、'Multi-Dip' 型 CRS (MDRS) 処理を適用することによって、当該地域における三波川変成岩帯及び領家帯花崗岩基盤の構造解釈に資する深部反射波列の抽出が可能となった (図 4)。

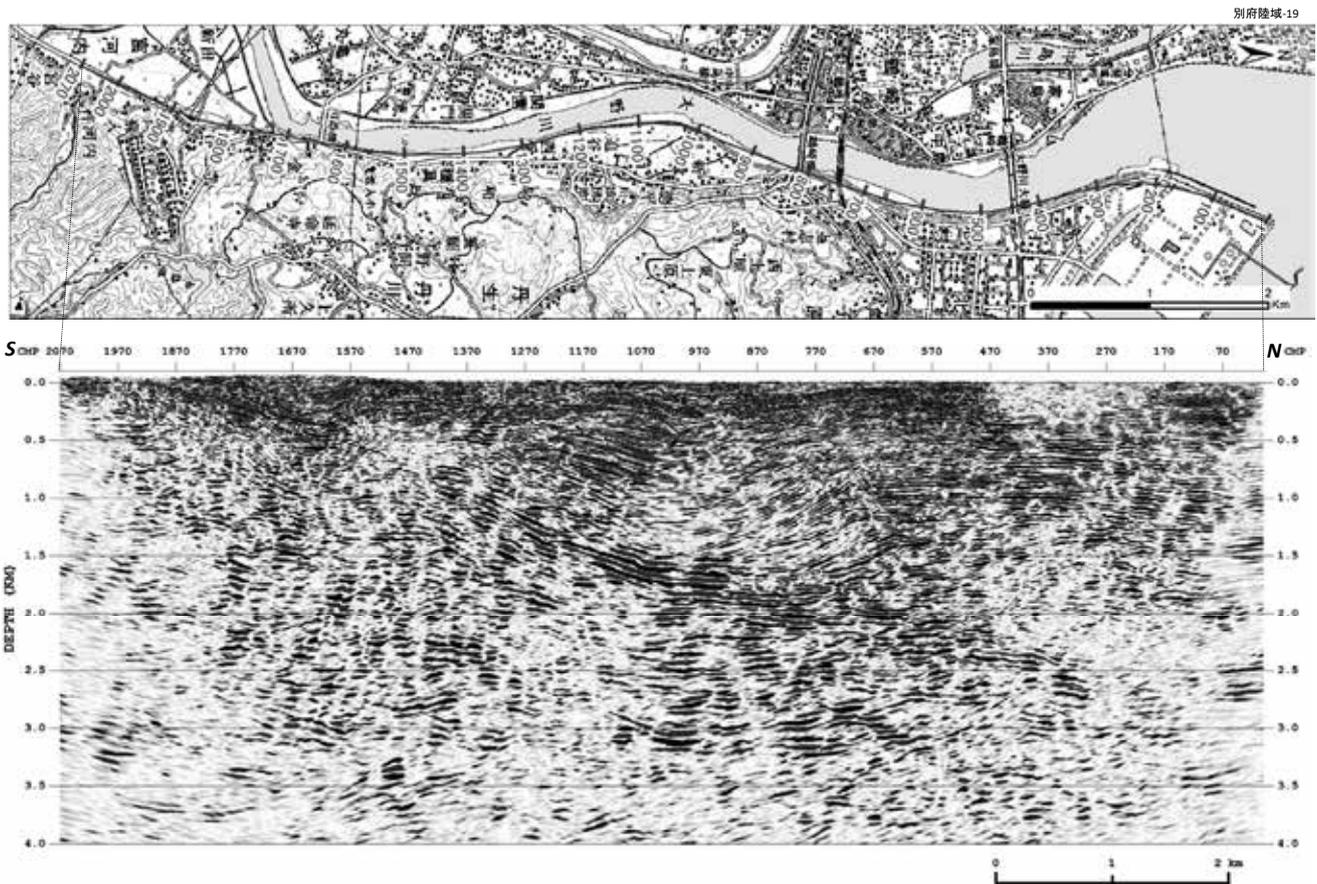


図 4 大分平野大野川バイプロサイズ (2001 大分県+2007 産総研) 新規再解析結果 MDRS 処理重合後マイグレーション深度断面図 (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2015))

・2016 年実施の大分平野地域の探査結果

千田ほか(2004)及び地震調査推進本部(2005)によると、大分平野北部の別府湾南岸地域においては、大分層群及び碩南層群相当層中の北傾斜の不連続構造として、東北東-西南西の走向を持つ三佐断層、志村-府内断層からなる別府湾南岸断層が議論されている。東西測線 Line-1 (図 5)において、府内断層は CDP. 220 近傍を横断する。今回の解析結果からは、現在の府内断層は、反射パターン及び断層上盤側の相対的な高速度領域の存在として、初生的には北落ちの正断層がインバージョンしている形状を持つことが示唆された (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2017)。また、同じく東西測線 Line-1 において、三佐断層は CDP. 950 近傍で斜交し、反射パターンの不連続及び屈折トモ

グラフィによって推定された速度の急変箇所（文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科，2017）に該当する（図6）。また、南北測線Line-A（図5）において、志村断層はCDP. 25で横断するが、反射パターンの不連続として認定され、Line-1に見られる府内断層と同様の断層ジオメトリーが示唆される（図7）。



図5 調査測線及び既存測線位置図(千田他(2004)及び地震調査研究推進本部(2005)を参照)。文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科(2017)

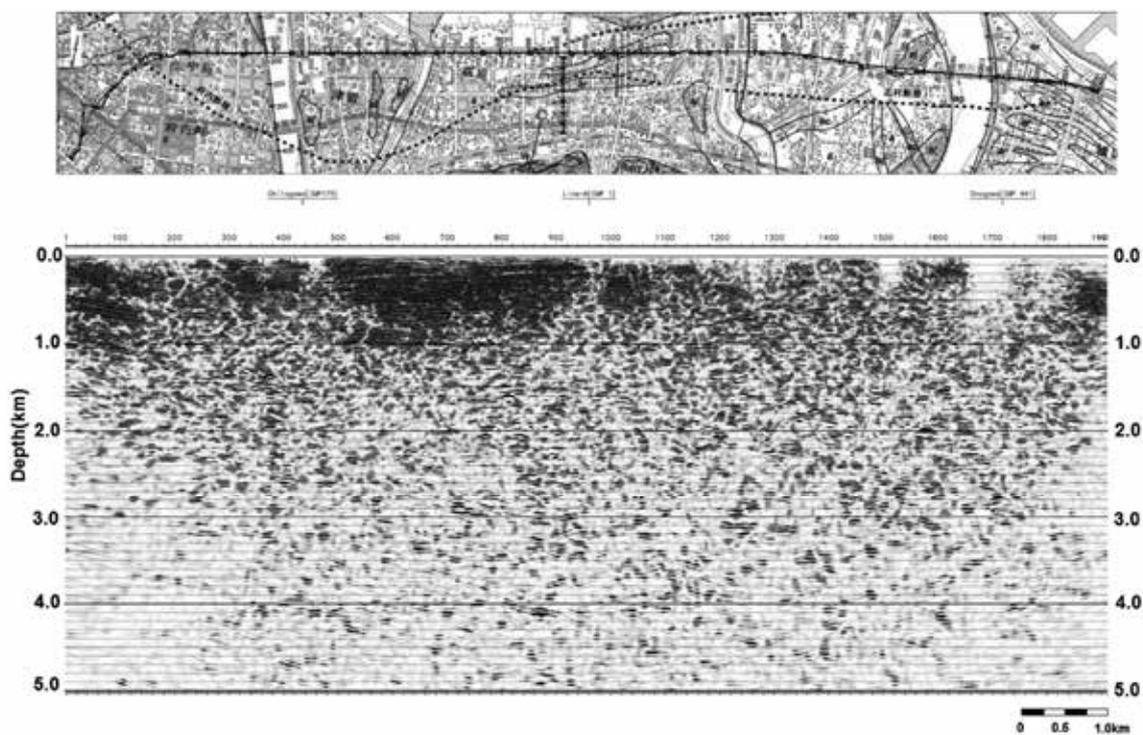


図6 Line-1 データ解析結果[2] MDRS 解析深度断面図(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科(2017))

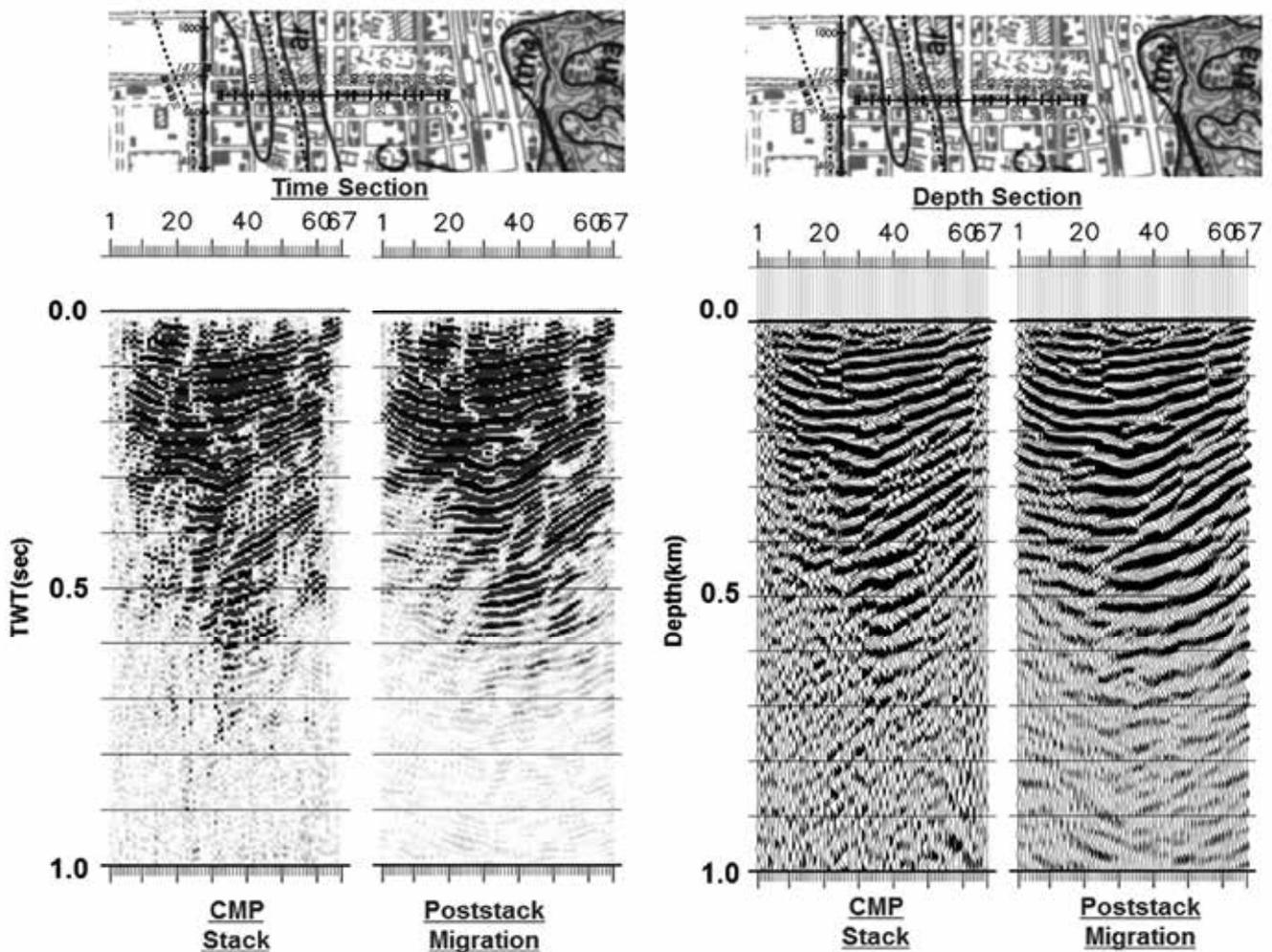


図7 Line-A データ解析結果[2] MDRS 解析深度断面図 (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017))

大分平野地域の探査結果解釈と地下構造との関連

この報告では、まず、大分平野周辺に分布する地層群についてまとめる。地震調査研究推進本部が実施した活断層および地下構造探査 (大分県, 1999~2004)、産総研データ (吉見ほか, 2008) による情報や文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017) による「別府-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」の成果報告も関連する情報が記載されている。

大分平野の地下に分布する可能性のある地層群は、下位から、三波川結晶片岩類、大野川層群、碩南層群、大分層群、段丘層と広く分布する大分平野を構成する沖積層 (吉岡ほか, 2000; 大分図幅や寺岡ほか, 1992; 犬飼図幅など) である。

三波川変成岩類は、佐賀関半島から大野川流域まで分布しており、大分平野の基盤を構成していると考えられる。由佐ほか (1992) の別府湾東部の反射法データによれば、北に向かって傾斜する三波川帯が北側から傾斜する領家帯との境界が明らかにされており、さらにこの反射法のデータからいくつかの構造の解釈が実施されている (Takemura *et al.*, 1994; Itoh *et al.*, 1998 など)。

大分平野内の基盤構造等を知るためには、三波川帯と領家帯の境界の西方への延長や、大分平野地下での分布状況を明らかにすることが重要であるが、別府湾を含む基盤構造の詳細を明らかにすることも必要である。別府湾内でこれまで実施されてきた反射法地震探査のまとめと推定された地下構造のテクニクな考察が、Itoh *et al.* (2014)により行われている。また Itoh *et al.* (2023) は、近年、別府湾口南部で実施された高分解能3次元地震探査による浅部堆積層の形状と堆積状況を示し、その形成プロセスが議論されている。変形した堆積層のスケールは異なるが、いずれの文献でも、別府湾内の堆積層の変形は、中央構造線の右横ずれ運動により引き起こされたことが示されている。このように、別府湾内の堆積層の変形には、中央構造線の右横ずれ運動が深く関わっている。また別府湾は中央構造線の第四紀の活動終端部であることもよく知られている(例えば、Itoh *et al.*, 1998)。一般に、中央構造線などの横ずれ断層端では、沈降域と隆起域が断層を挟んで対で形成される。当地域では、中央構造線の北側に相当する別府湾が沈降域に、南側に相当する大分平野が隆起域に相当する。実際、別府湾から大分平野に向けて基盤が浅くなっていることは、地震波探査結果だけでなく、重力異常から推定された基盤構造でも示されている(例えば、駒澤・鎌田, 1985; Kusumoto *et al.*, 1996)。

中央構造線の活動は長期にわたり、その動きも時の応力場に支配されているため、物質境界としての中央構造線と活構造としての中央構造線の双方の観点から、この構造線周辺の地形や地質を解釈していく必要がある。このような意味合いから、大分平野南方の基盤分布域までの連続的な基盤構造を三波川変成岩の北限や基盤地質の地質境界としての中央構造線、活構造としての中央構造線の分布との関係で確認することは重要な課題となる。そのためには、平野で実施した地震探査測線の結果と対応する地下地質の解析が必要であり、掘削試資料の追加調査を含めて、この点の詳細調査が期待される。

三波川帯の上位にあたる大野川層群は、大野川東岸域で三波川帯の地層群を取り巻くように分布し、大野川西岸では、碩南層群判田層に覆われている。大分平野下に大野川層群が分布するかどうか、分布するとすればどのような形態で地下に分布するかの検討と共に、大野川層群と碩南層群判田層の境界が大分平野側地下にどのような分布をするかの確認も検討が必要な課題である。

基盤岩を覆う新生代第三紀以降の地層群としては、地表露出する碩南層群、大分層群、段丘堆積物および沖積層が、少なくとも800mを超える温泉掘削の情報から、大分平野地下にも存在していることが知られている(森山・日高, 1986)。平野部では、基盤岩に到達する資料・試料は確認されていない。基盤深度構造を想定するためには、地震探査等の物理探査のデータから推定することが必要であり、今回の報告でその一部を報告できた。大分平野地下での碩南層群・大分層群の上位に、段丘堆積物相当の地層と沖積層が重なっている。浅部の活断層等の構造解析のためには浅部のボーリングの解析と浅層の物理探査(重力探査や地中レーダー探査など)の総合的な解析が重要である。

大分平野の堆積構造を規定する上で、白亜系大野川層群の分布の有無が重要となる。泥岩、砂岩及び礫層の交互層から成る大野川層群は、層相の側方不均質が顕著であり、淘汰が良好ではない固結度の高い多様な礫種から構成される(三郡変成岩由来を含む)。三波川変成岩類は、佐賀関山地から北西の大分平野地域へと、大野川層群下に潜り込んでいる(寺岡ほか, 1992; 斎藤・宮崎, 2016 など)。従って、既存反射法測線である大野川測線(2001年大分県、吉見ほか, 2008)とLine-1東部域の交点における地震基盤相当の強反射境界深度は2100m、大分川測線(1999年大分県、吉見ほか, 2008)とLine-1西部域の交点では3200mであり、これらの強反射境界面は、三波川変成岩上面として解釈される。また、Line-1において比較的データ品質が良好な測線西部域及び大分川測線との交差域では、深度1500m程度から基盤相当層上面まで、区間速度は3000m/sec以上を示す。また、反射波群に乏しい傾向が強く、不均質性が高く、かつ内部で反射境界を生成しにくい白亜系大野川層群が分布している可能性が高い。一方、大野川以東のLine-1区間及び大野川測線では、基盤相当深度まで相対的に反射波に富む傾向が強く、大分層群及び碩南層群が厚く堆積するか、あるいは、大野川層群内の砂泥互層が卓越傾向にあることを示唆している。

大分平野における強震動予測の高精度化に向けた三次元速度構造モデルの構築では、断層位置及び断層ジオメトリの把握と共に、三波川変成岩による基盤構造の把握が重要な課題である。また、相対的に高速度-高密度である白亜系大野川層群と三波川変成岩類との接合関係と大野川層群の層厚分布の同定が必要である。従って理想論ではあるが、大分平野において広域的に観測された重力データを用いた三次元逆解析が望まれる。想定する地質構造モデルとしては、沖積層-大分層群-碩南層群で構成される上位堆積層、三波川変成岩類からなる基盤面に加えて、白亜系大野川層群を定義し、その三次元的な層厚変化を推定することが望まれる。大野川以東の丹生台地以南に分布する三波川変成岩類について、その北縁部が大分層群に不整合に被覆されることと調和的であることから、大分平野東部域における大野川層群分布域の推定は重要な課題である。

以上の様に、別府湾南岸地域の大分平野を東西に横断する区間において、制御震源を用いた反射法地震探査データを用いた解析によって、別府湾南岸断層の位置・形態及び地下構造を理解する上で重要な知見が提示できたものと考えられる。MDRS 重合深度記録に関する四方向からの鳥瞰表示図(図8)を示す。今後、これまでの反射法地震探査結果の再解析結果をもとに、反射パターン認識、各種の地震波アトリビュート表示、さらには重力異常や重力異常から推定される重力偏差データを用いた解析を通して得られる別府湾南岸域の断層の基本形状の把握を行うことが重要である。また、大分平野速度構造モデルの構築をとおして構造と共に大分平野および別府湾周辺域の形成過程に関わる統合解釈を進展させることが望まれる。

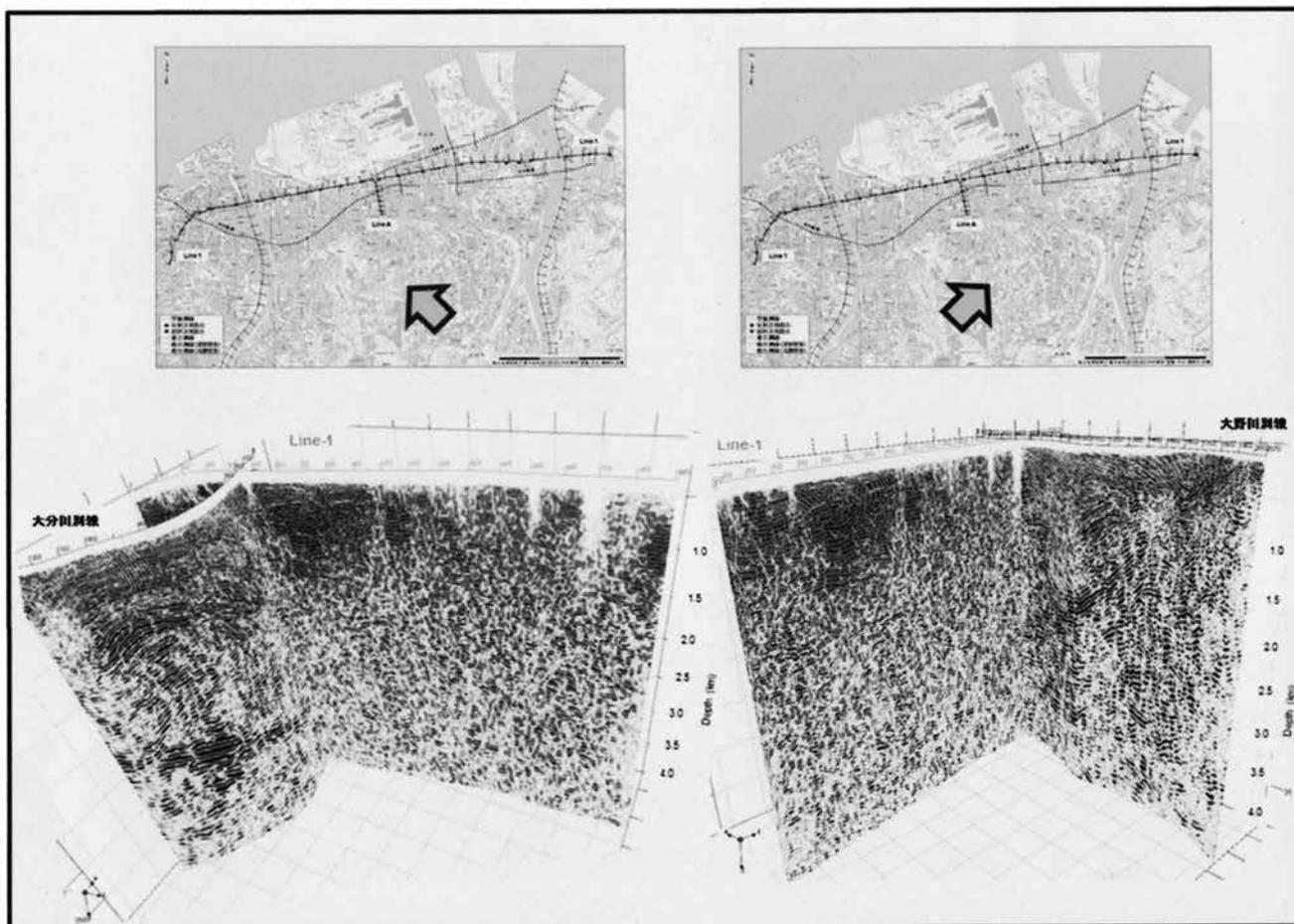


図8 大分平野深部構造探査断面_鳥瞰表示図 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2017)

まとめ

現在の地質学的知見からは、大分平野地下に分布する可能性のある地層群として、大分平野を取り巻く地質体は、大きく古第三紀までの基盤岩類と新第三紀以降現在までの基盤岩類を覆っている地層群が挙げられる。大分平野を取り巻く基盤岩類は、東から三波川変成岩類、大野川層群、大分平野の西方の野津原付近に分布する朝地変成岩類（竹村・楠本，2023）である。地表分布の地質体を地下の地質体の地質構造的に考察することは、重要な意義を有する。とくに大野川層群の存在の有無を含む基盤岩の分布形態とともに大分平野域の別府湾形成や中央構造線の活動史の考察は、今後の本地域の活動性を考えていく上で重要である。そのためにも新第三紀以降現在までの基盤岩類を覆っている地層群としての碩南層群、大分層群、段丘堆積物及び沖積層の構造と断層分布の精緻な推定が望まれる。また、その両者の統合は、大分平野下の温泉・地熱等の利活用等を考察する上で、重要な意義を有すると考えられる。

文献

- 千田 昇・竹村恵二・松田時彦・島崎邦彦・池田安隆・岡村 眞・水野清秀・松山尚典・首藤次男 (2004) : 大分平野東部に伏在する活断層, 活断層研究, 24, 185-198.
- 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎 (1988) : 「別府地域の地質」5 万分の 1 地質図幅及び説明書, 131 頁. 地質調査所.
- Itoh, Y., Takemura, K. and Kamata, H. (1998): History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics*, 284, 135-150.
- Itoh, Y., Kusumoto, S. and Takemura, K. (2014): Evolutionary process of the Beppu Bay in central Kyushu, Japan: a quantitative study of basin-forming process under the control of plate convergence modes. *Earth, Planet and Space*, vol. 66, 66-74 (doi:10.1186/1880-5981-66-74).
- Itoh, Y., (2023): Clearer Picture of the Spatiotemporal Growth of a Pull-Apart Basin - High-Resolution Geophysical Study at the Termination of an Arc-Bisecting Fault, Southwest Japan. InTech, ISBN: 978-0-85014-371-3. doi: 10.5772/intechopen.110456.
- 駒澤正夫・鎌田浩毅(1985): 豊肥地域の重力基盤構造, 地質調査所報告, 264, 305-333.
- Kusumoto, S., Fukuda, Y., Takemoto, S. and Yusa, Y. (1996) : Three-dimensional subsurface structure in the eastern part of the Beppu-Shimabara Graben, Kyushu, Japan, as revealed by gravimetric data. *J. Geod. Soc. Jpn*, 42, 167-181.
- 森山善蔵・日高 稔 (1986) : 大分市温泉の地質. 大分県温泉調査研究会報告, 37 号, 38-49.
- 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科 (2015) : 「別府一万年山断層帯 (大分平野一由布院断層帯東部) における重点的な調査観測」平成 26 年度成果報告書.
- 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 (大分平野一由布院断層帯東部) における重点的な調査観測」平成 26~28 年度成果報告書、526p.
https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/beppu_haneyama/h28/26_28Report_all.pdf
- 大分県 (1999) 別府一万年山断層帯に関する調査. 平成 10 年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 70p.
- 大分県 (2000) 別府一万年山断層帯に関する調査. 平成 11 年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 155p., 50p., 60p., 52p.
- 大分県 (2001) 別府一万年山断層帯に関する調査. 平成 12 年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 171p.

- 大分県（2002）別府－万年山断層帯に関する調査. 平成 13 年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 62p., 65p., 45p., 85p.
- 大分県（2003）別府－万年山断層帯に関する調査. 平成 14 年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 70p.
- 大分県（2004）別府－万年山断層帯に関する調査. 平成 15 年度地震関係基礎調査交付金成果報告書, 70p.
- 斎藤 眞・宮崎一博（2016）平成 28 年（2016 年）熊本地震及び関連情報：中央構造線に関する現在の知見－九州には中央構造線はない－.GSJ 地質ニュース, vol.5, p.175-178.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター（2020）：20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2. <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2/viewer/>
- Takemura, K., Yusa, Y. and Itoh, Y. (1994): Quaternary tectonic movements around Beppu Bay at the western end of the Median Tectonic Line, southwest Japan. Spec. Pub. Jour. Geod. Soc. Japan (Proc.CRCM'93, Kobe), 401-405.
- 竹村恵二（2019）九州中部のテクトニクスからみた熊本地震. 第四紀研究, 58, 91-99.
- 竹村恵二・楠本成寿（2023）：大分平野の地下構造－. 大分県温泉調査研究会報告, 74号, 9-19.
- 寺岡易司・宮崎一博・星住英夫・吉岡敏和・酒井彰・小野晃司（1992）犬飼地域の地質. 地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）, 地質調査所, 129p.
- 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.
- 吉見雅行・吉田邦一・関口春子・堀川晴央・竿本英貴・松浦旅人（2008）：微動アレイ探査で推定した大分平野の S 波速度構造, 活断層・古地震研究報告, 8, 295-315.
- 由佐悠紀・竹村恵二・北岡豪一・神山孝吉・堀江正治・中川一郎・小林芳正・久保寺章・須藤靖明・井川猛・浅田正陽（1992）: 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造, 地震2, 45, 199-212.

