

別府温泉の地球科学的研究抄

由 佐 悠 紀¹⁾

A Brief Review of Earth Scientific Studies of the Beppu Hydrothermal Field, Kyushu Island, Japan

Yuki YUSA¹⁾

Abstract

An outline of earth scientific studies carried out in the Beppu hydrothermal field, which is one of the largest hydrothermal fields in Japan, during 1920's through the first half of 2000's. Studies are hydraulics of groundwater, evaluation of outputs of water, heat and chloride ion, and modeling of hydrothermal processes including estimation of temperature and chloride ion content of parent thermal water. It is required to clarify physical and chemical properties of supercritical water ascending from deep layer.

Key words : Beppu hydrothermal field, History, Earth sciences, Episodes, Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University (BGRL)

要 旨

わが国における最大規模の温泉地のひとつである別府温泉（大分県）において、1920年代から2000年代前半までに行われた地球科学的研究の概要が述べられる。研究内容は、地下水理学的研究、流出水量・熱量・塩化物イオン量の評価、原熱水の温度や塩化物イオン濃度の推定をはじめとする温泉の生成機構のモデリングなど多様である。地下深部から上昇する超臨界水の物理的・化学的性状の解明が望まれる。

キーワード：別府温泉，歴史，地球科学的研究，エピソード，京大地球熱学研究施設（BGRL）

1. はじめに

2009（平成21）年9月7～9日に京都で開催された日本温泉科学会第62回大会において、筆者はセッション2（地球科学）の基調講演「温泉現象の地球科学的研究の過去・現在・未来」を受け持った（由佐，2009）。本文はその補遺的な続編であり、別府市にある京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設（BGRL；Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University）で行われ

¹⁾ 京都大学名誉教授 〒606-8501 京都市左京区吉田本町。 ¹⁾ Kyoto University, Emeritus Professor, Yoshida Honmachi, Sakyo, Kyoto 606-8501, Japan.

てきた地球科学的な温泉研究を、エピソードをまじえながら述べたいと思う。なお、筆者の個人的な事柄も入っていることをご寛恕いただければ幸いである。

2. 別府温泉の極めて簡単な歴史

大分県の活火山「鶴見岳・伽藍岳」の東麓，別府湾に面する東西 5 km×南北 8 km の扇状地に展開する別府温泉が，源泉数・流出熱量・流出水量・泉質の多様さ，加えて観光施設と観光客数および旅館・ホテルなどの宿泊施設数など多面からみて，わが国で最大規模の温泉地であることは大方の認めるところであろう。

その歴史は奈良時代の「豊後国風土記」や「伊予国風土記（逸文）」の記述にまでさかのぼり（吉野，1969），わが国最古の温泉地に属する。近世においても，1694（元禄 7）年の貝原益軒の紀行文「豊国紀行」をはじめとして，地獄や温泉宿の記録が残されている（安部，1987）。それらの温泉は自然湧出の温泉であったが，明治時代になって間もなく掘削による温泉が登場し，源泉数が急速に増大した。そのため温泉資源・既存温泉への影響が憂慮され，1905（明治 38）年には，大分県知事の命により温泉の現況調査が行われた（松田，1905）。それによれば，別府町に掘湯 21・穿湯 145，浜脇町に掘湯 4・穿湯 28，合計 198 ヶ所の源泉があった。両町が合併し別府市制が敷かれたのは，1924（大正 13）年である。なお，掘湯とは地面を掘り下げて湯槽を設け，その底から湯を湧き出させるもので，自然湧出泉に近い。他方，穿湯は現在の掘削井に当たる。掘削方法は，別府では「湯突き」と呼ばれたが，上総掘りである。

【エピソード-1：外国人による最初の記述】日露戦争後の 1906 年頃，熊本から阿蘇を経て別府を訪れた英国人写真家ポンティングが，別府には沢山の温泉があること，海岸の砂湯のこと，熱活動が活発な鉄輪（かんなわ）での入浴法・蒸し風呂・噴気による料理，さらには地獄の状況などを記録している（Ponting, 1911）。外国人による記録は大変珍しく，浅い湯舟に横たわる入浴法の説明や写真もあって，興味深い。この後，ポンティングはスコットが率いる英国の第 2 次南極探検隊（1910-13）に参加したが，基地では日本など世界各地のスライドを映写して好評だったというから，極点旅行の帰途遭難死したスコットらも別府・鉄輪の写真を見ていた可能性が高い。

温泉開発はますます進み，大正末期～昭和初期における別府・浜脇の源泉数は 800 口前後に達し，既存温泉が影響を被るという事態が発生していた。しかしその後，第一次および第二次世界大戦をはじめとする多くの国際紛争や世界的な恐慌の影響を大きく受けて温泉の開発は沈滞し，本格的な開発が行われだしたのは第二次世界大戦終結後である。特に 1960 年代の経済高度成長期には，毎年 100 本前後の新規掘削がおよそ 10 年間継続して行われた。冒頭に述べた「最大規模の温泉地」は，これによって現実化したといえる。

3. 別府温泉の本格的な調査・研究のはじまり

別府における本格的な調査・研究は 1924（大正 13）年 1 月に始まった。その前年の 12 月，京都大学地球物理学科の初代教授・志田 順の尽力によって，地球物理学研究所（BGRL の前身）の本館建物が竣工したのである。設立目的は「火山・温泉・地熱に関する総合的研究」であったが，先に記したように，新規温泉の掘削が既存温泉に影響を及ぼすという現実的な問題への対策も求められていた。当時の別府町が BGRL を誘致し，その開設に大きな便宜をはかったのは，そうした事情

もあったからと推察される。

このような状況の中で、まず着手されたのは「温泉の総調査（個々の源泉の井戸の状態・湧出量・泉温等を記録）」・「温泉台帳の作成」および「いくつかの源泉での泉温・湧出量の継続観測」であった。これらは BGRL のルーチン的な仕事として続けられた。

【エピソード-2：初期の研究者の心意気】別府での温泉調査開始に先立つ 1922（大正 11）年の夏、志田教授の指導によって大分県由布院温泉の調査が行われた。これが、京大地球物理学科による最初の温泉調査ではなかったかと思われる。JR 久大本線が開通する以前に現地調査を行い、それから 15 年後に論文を書いたのは依田和四郎理学士（後に京大教養部教授）である。別府温泉の研究ではないが、その緒言には当時の研究者の心意気を感じられるので、その部分を以下に引用する（依田、1937）。ただし、一部仮名遣いなどを書き換えた。

さて著者等が本測定を行った理由は当温泉は山間に在って当時交通の便未だ備わらず温泉地としての設備極めて不十分従って人工の施されたもの僅少であったので地下温度その他の状況は人工の全然加わらなかった以前と大差ないものと推定せらるること、また当地も近い将来に鉄道開通の予定（今日は既に開通している）であったり且又当時別府から直接電車建設の議もあった程であるから必ず近い将来に於いて人工大いに加えられ近代的温泉となるものと思考せられ、加えられた人工が自然の状況を如何に変化せしめるものであるかを知るに絶好の場所であり且つ又と得難い機会であると考えられたが為である。

【エピソード-3：75 年におよぶつながり】BGRL の温泉研究は 1924 年に始まったが、その公式の開所式は開所式が挙行された 1926（大正 15）年 10 月 28 日である。その頃、京大理学部 3 年生の速水頌一郎（後に京大理学部教授）が別府に滞在して温泉調査を行っていた。志田教授は速水青年の指導教授だったのである。そのときの様子を、速水教授の著書から抜粋して下に掲げる（速水、1974）。文中の「先生」は、志田教授である。

その年すなわち大正 15 年の秋、同研究所の開所式が行われることになり、わたくしは数名の学友とともに三ヶ月間別府ですごした。その間に別府温泉について温泉井内の温度分布を測定させられた。そして湧出口附近の泉温はまちまちであるが、孔底温度はほとんど一様であって、いくつかの温度に分けられることを知った。先生はこの結果を卒業論文にまとめるようにいわれた。…（略）…しかし湧出量の測定がそのとき同時にできなかったので、うまく測定結果をまとめることができなかった。

この問題は後になって野満教授と瀬野錦蔵博士によって発展され、湧出量の多いほど途中の冷却が少ないということで孔底温度・湧出量・湧出口温度の関係式が解かれ、未知の要素は係数として観測値からきめるというやり方で巧みにまとめられ、いまでも使われている。

ここに登場している野満教授とは京大地球物理学科海洋物理学講座の初代教授・野満隆治のことである。瀬野錦蔵博士は野満教授の薫陶を受け、BGRL の現地主任を長年にわたって務められた。この文で取り扱われている湧出量と泉温の関係のモデルは、温泉の熱源の問題へと展開された [たとえば（瀬野、1941）；（福富、1965）]。また、主に 1970 年代以降、平野部や堆積盆地で深い掘削によって開発された非火山性温泉における汲み上げ量と泉温との関係に拡張・応用された（吉川・北岡、1985）。さらに、このモデルは、筆者らによって、火山活動の無いモンゴルの高温温泉の熱源の

考察に適用された (由佐・田箒, 2001).

速水教授は筆者の指導教授 (海洋物理学) であったばかりでなく, 筆者を BGRL の助手に推薦し, 海洋物理学から温泉科学への転向のきっかけを作られたのであるが, ご自身が別府温泉の調査を行い, しかも卒論がこのモデルに関係していたことは, ずっと後になって知った. 先生の卒論から 75 年後に筆者が関連のある論文を書いたことに, えもいわれぬ縁を感じている. 志田教授も速水教授も温泉科学とは無関係のように思われているのであるが, 別府における (ひいては, わが国における) 温泉研究の草創期に関わっておられたのである.

4. 地球科学的温泉研究に関する学術誌

ここで, 当時の地球科学的温泉研究に関する学術誌の状況を見ておこう. 昭和初期に発行された記念碑的著書「温泉の物理」(福富, 1936) および初めての本格的な教科書「温泉学」(湯原・瀬野, 1969) に挙げられている文献などから推察すれば, 地質学では「地学雑誌」, 地理学では「地理学評論」が代表的な雑誌であった. 加えて京大では, 1924 (大正 13) 年から地質学教室が刊行した「地球」(月刊) に, ときおり温泉の特集号が組まれていた. このように, 地質学・地理学分野の状況はかなり恵まれていたようである.

他方, 地球化学の分野では「日本化学会誌」があったが, 地球物理学関係では適切な雑誌が無く, 首都圏の研究者 (本多光太郎・寺田寅彦・前田 競・宮部直巳・福富孝治ら) は, 「地震」・「地震研究所彙報」・「Bull. Earthq. Res. Inst.」などに発表していた. BGRL でも研究成果が徐々に現れ始めたが, 発表の場に苦労したようで, 当初は日本数学物理学学会総会で口頭発表し, その要旨を日本数学物理学会雑誌に掲載していた. このような状況が改善されたのは, 野満教授の主導によって, 1937 (昭和 12) 年に京大地球物理学教室が機関誌「地球物理」(年間 4 回) を刊行するようになってからである. BGRL が開かれてから 13 年が過ぎていた. なお, 「地球物理」は 1954 (昭和 29) 年まで刊行された.

5. 温泉の地下水理学的研究

「地球物理」に掲載された別府に関する最初の論文は, 助教授・鈴木政達 (1937) による「別府附近の地史と温泉脈」である (鈴木, 1937). 内容は地質学的であるが, 地球科学としての総合的な温泉研究の方向を示唆している. しかし, 鈴木助教授が早世したこともあって, 当時, この方面の研究はそれ以上には展開されなかった.

BGRL 開設以来, 戦中・戦後を経て 1960 年代半ば頃まで, 野満教授と瀬野錦蔵助教授が中心となって推進された研究は, 潮汐・気圧・降雨などの自然条件の変動が温泉現象に与える影響の解析であった. すなわち地下水理学的な研究である. 得られた成果は「地球物理」に掲載された (たとえば, 野満・瀬野・中目, 1938).

それらの研究の基となったデータ類は, 別府温泉で行われた長年にわたる地道な観測調査によって得られたもので, そうした観測調査を指揮したのは, 初めは志田 順教授, 次いで野満教授であった. 筆者は 1966 (昭和 41) 年 5 月に BGRL に赴任したが, その頃も, 開設以来の継続観測が続けられていた. そのひとつは, ある温泉井で 40 年以上にわたって行われた 1 日 1 回の継続観測である. これについて記した文があるので, エピソードとして引用・紹介する (由佐, 1989). なお, 記録の詳細な解析結果は「温泉科学」に掲載されている (吉川, 1964).

【エピソード-4: 40年以上にわたる1日1回の継続観測】

別府駅から西方山の手およそ500mの所に宮地嶽神社という小さな社がある。その境内に、さしわたし1mほどの手掘りの浅井戸があった。井戸の深さは約8.5m、もっとも浅層の不圧地下水を汲んでいたのであるが、かなり高温で、大正14(1925)年1月に行われた最初の測定によれば、43.2°Cもあった。立派な温泉である。以来、京大地球物理学研究施設では、原則として1日1回、その水位と水温を測定してきた。諸般の事情で欠測を余儀なくされた時期もあったが、昭和42(1967)年にこの井戸が枯渇するまで、40年以上にわたって、ともかくも観測が続いたのは他に類をみないことで、残された資料は貴重である。

(中略)

この観測を計画し指揮された志田 順・野満隆治、最初の論文を書かれた瀬野錦蔵の大先達は、とくに鬼籍の人である。いったいどれくらいの人がこの長期観測にかかわられたのか。とくに初期の観測員の人々のことは知るよしもない。筆者は、最後の2年間だけこれに参加した。この井戸の枯渇を見とどけたというわけである。当時はこの観測の意義を理解できず、少々めんどくさく感じていたことを思い出すのであるが、今となっては、またとない体験をさせてもらったものだと、感慨深いものがある。

6. 日本温泉科学会とのかかわり

「日本温泉科学会」の創立は1939(昭和14)年6月、機関誌「温泉科学」の創刊は1941(昭和16)年3月であるから、「地球物理」の創刊とはほぼ同じ時期である。しかし、これに最初からBGRLのメンバーが参加したかどうかは不明である。筆者が調べた範囲内であるが、BGRLのメンバーが「温泉科学」に初めて現れるのは、1950(昭和25)年4月に開催された第3回大会(和歌山県勝浦温泉)の記事である。瀬野錦蔵・山下幸三郎が「別府温泉の湧出量の相互関係について」を発表した。野満教授は1947(昭和22)年に退職後ほどなく逝去されたので、このころのBGRLの研究は瀬野助教授が主導していたのである。

野満・瀬野によって進められてきた地下水理学的研究は、新たに参加した新進気鋭の研究者たちによって展開された。第4回大会(1951年、静岡県嵯峨沢温泉)では、吉川恭三・川端 博・軽部末蔵が発表し、瀬野錦蔵が評議員に選任された。また、第5回大会(1952年、大分県由布院温泉)では、瀬野助教授が特別講演を行い、川端 博・吉川恭三・山下幸三郎・瀬野錦蔵が発表した。第6回大会(1953年、福島県飯坂温泉)では前記の諸氏に加えて湯原浩三が発表した。こうして、BGRLのメンバーは「日本温泉科学会」に研究発表の場を得たのである。

別府にはもうひとつの温泉研究機関があった。1931(昭和6)年に設立された「九州大学温泉治療学研究所(九大温研)」である。そのメンバーは「日本温泉科学会」の創立に関わり、1982(昭和57)年に「九州大学生体防御医学研究所」に改組されるまで、大会に参加し、また「温泉科学」に研究論文を発表した。研究は主に医学分野であったが、1959(昭和34)年に設置された温泉理学部門では、古賀昭人・野田徹郎らによって地球科学的研究が行われた。

7. 温泉相互間の影響に関する調査研究と大分県温泉調査研究会

初期のBGRLにおけるもうひとつの重要な研究は、温泉相互間の影響に関するものであった。その基礎的な成果として、温泉井からの揚水影響に関する理論式の導出がある(野満・山下, 1943)。

この理論式は、一般には「タイスの式」と呼ばれるが、野満らは独立に導出したので、「タイス—野満の式」とも呼ばれる。

さて、1948 (昭和 23) 年、「温泉を保護しその利用の適正を図る」ことを目的として、温泉法が公布・施行された。これに応じて各県に「温泉審議会」が設置されたが、大分県は、審議に必要な科学的資料を得るため、1949 (昭和 24) 年、「大分県温泉調査研究会」を設立した。当初の主要メンバーは、BGRL と九大温研の研究者であった。取り上げられた最初の事業は、源泉が密集する別府温泉における温泉相互間の影響調査であった。瀬野錦蔵・山下幸三郎を中心に、多くの揚水試験が実施され、得られた資料および解析結果は「大分県温泉調査研究会報告」に掲載された (たとえば、山下, 1961)。この調査研究を通して、「タイス—野満の式」は「漏れのある地下水層」に適用できるように展開され、その主要部分は「温泉科学」に掲載されている (吉川・山下, 1959)。後年、そうした取り扱いの延長として、地域的な揚水の影響が考察された (由佐, 1984, 1987)。

なお、「大分県温泉調査研究会」は現在も存続しており、2010 (平成 22) 年には報告第 61 号が発行された。

8. 1970 年代以降の調査研究

筆者は 1966 年 5 月に BGRL に赴任し、研究分野をそれまでの海洋物理学から温泉科学に変更した。経済高度成長に伴う温泉開発ブームが進行中で、とくに高地部では多数の噴気および沸騰泉が掘削されつつあった。これによって、別府全域におよぶ地下温度分布や温泉水位分布のデータが得られた (吉川, 1972)。

噴気・沸騰泉から噴出する熱水・蒸気の測定は湯原 (1964) が初めて行い、開発が一段落した後には筆者らも実施した [(吉川・由佐, 1976); (由佐・大石, 1988)]。これらをはじめとしてさまざまな調査・研究が行われた。それらのうち、2000 年代前半までの代表的なものをいくつか下に掲げる。

温泉水の化学組成 [(由佐・川村, 1971); (由佐, 1979); (由佐ら, 1989)]; 温泉ガスの化学組成 (古賀・野田, 1973); 流出水量・熱量・科学成分量 (由佐ら, 1975); 温泉水のトリチウム [(北岡, 1981); (Kitaoka, 1990)] および水素・酸素安定同位体 (北岡ら, 1993); 重力 (福田ら, 1994); 温泉水の流動経路 (由佐ら, 1994; 大沢ら, 1994; 伽藍岳の地熱現象 [(湯原ら, 1987); (由佐ら, 1995)], 温泉の色に関する研究 (大上ら, 1997); (Ohsawa *et al.*, 2000); (大沢, 2004); (大上, 2006)]

一方、別府および周辺地域では、1973 (昭和 48) 年の第 1 次オイルショックを契機に本格化した地熱開発の調査が実施され、地熱・温泉に関する多種多様な地球科学的データが得られた (たとえば NEDO, 1990)。

以上の調査研究などにに基づき、別府温泉における浅層の地熱—温泉系のモデルが提案され [(Allis and Yusa, 1989); (由佐ら, 1996)], その年齢は約 5 万年と推定された [(由佐・大沢, 2000); Yusa and Ohsawa (2000)]. また、100 年に及ぶ開発に伴って生じた温泉系の変化が明らかにされた [(Yusa *et al.*, 2000); (由佐ら, 2002)]. さらに、日本列島のような沈み込み帯に分布する温泉水・温泉ガス中の物質の起源・循環モデルが考究された [(由佐, 1996); (大沢, 2006)].

9. おわりに

別府温泉ではさまざまな研究が行われてきた。その初期から 1960 年代頃までの中心課題は地下

水理学的研究であったが、1970年代頃から、ようやく BGRL の設立目的である「火山・温泉・地熱に関する総合的研究」が進められるようになった。それが可能となったのは長年の調査観測および多数の温泉井の掘削によって多種多様な資料が蓄積されたことに加えて、電磁探査をはじめとする地球物理学的探査手法、また、化学分析・放射能測定・同位体分析などの地球化学的技術が利用できるようになったからである。その根底には、もちろん、プレートテクトニクスによる地球観の革新がある。得られた主な成果や推定を以下に箇条書きする。

1. 別府温泉では山地から海岸に向かって、噴気（蒸気のみが噴出）、沸騰泉（熱水が沸騰しつつ噴出）、一般温泉（沸騰点より低温の温泉が流出）の順に分布する。
2. 別府温泉から1日あたりに流出する温泉水量は5万トン（蒸気を含む）、熱量は7テラカロリー（350MW）、塩化物イオン量は35トンである（いずれも概数）。
3. 温泉水のほとんどは雨水起源である（マグマ水は検出されていない）。
4. 地下温泉水の平均滞留時間はおよそ50年である。
5. 別府温泉を涵養する原熱水は、鶴見岳・伽藍岳の地下に分布する塩化物泉型の熱水で、その温度は250~300°C、塩化物イオン濃度は1400~1600 mg/kg である。
6. さまざまな泉質の温泉水は、原熱水と天水との混合を基調とし、地下での熱水の沸騰と蒸気の凝結（相変化）および岩石類との化学反応によって作られる。
7. さまざまな泉質の温泉水は、水平的のみならず立体的に分布し、それぞれの流動経路は異なる。
8. 別府における現在の地熱—温泉系の年齢は5万年程度である。
9. 塩化物イオンをはじめとする物質には、沈み込む海洋プレートとともに引きずり込まれる海水および海成堆積物からの寄与が大きいと推定される。
10. 電磁気学的な資料を参照すれば、伽藍岳の地下に（海面下5~6 km 深）比抵抗の小さい高温流体の上昇が推定される。この流体は超臨界水と思われ、その物理的・化学的な性状の解明が今後の重要な研究課題である。

謝 辞

温泉現象は極めて局所的な現象であるが、汎地球的でもある。本文で記述してきた別府温泉の地球科学的特徴は、世界各地の温泉・地熱現象に共通するものであることを特記し、これまでの研究者に深い敬意を表して、稿を終える。

引用文献

- 安部 巖 (1987) : 別府温泉湯治場大事典, 創思社出版, 東京.
- Allis, R.G. and Yusa, Y. (1989) : Fluid flow processes in the Beppu geothermal system, Japan. *Geothermics*, **18**, 743-759.
- 福田洋一, 瀬木 哲, 馬渡秀夫, 竹村恵二, 由佐悠紀 (1994) : 別府地域の重力調査—由布院断層, 朝見川断層調査—. 大分県温泉調査研究会報告, **45**, 15-23.
- 福富孝治 (1936) : 温泉の物理 (岩波科学文献抄 12), 岩波書店, 東京.
- 福富孝治 (1965) : 地下水起源の温泉の温度. 北海道大学地球物理学研究報告, **13**, 53-70.
- 速水頌一郎 (1974) : 海洋時代, 東海大学出版会, 東京.
- 北岡豪一 (1981) : 温泉水中のトリチウム濃度 (Ⅲ) 別府亀川地区. 大分県温泉調査研究会報告, **32**, 1-6.

- Kitaoka, K. (1990): Water circulation rates in a geothermal field. A study of tritium in the Beppu hydrothermal system, Japan. *Geothermics*, **19**, 515-539.
- 北岡豪一, 由佐悠紀, 神山孝吉, Stewart, M.K., 日下部実 (1993): 水素と酸素の安定同位体比からみた別府温泉における地熱流体の移動過程. *地下水学会誌*, **35**, 287-305.
- 古賀昭人, 野田徹郎 (1973): 別府地熱地帯の噴気ガス成分. *大分県温泉調査研究会報告*, **24**, 55-63.
- 松田 繁 (1905): 大分県別府四近温泉調査報告, 大分県知事宛の報告書「別府・浜脇町鉱泉に関する取調書類」.
- NEDO (1990): 平成元年度全国地熱資源総合調査 (第 3 次) 広域熱水流動系調査鶴見岳地域地熱調査成果図集.
- 野満隆治, 瀬野錦蔵, 中目廣安 (1938): 別府温泉と潮汐附気圧効果. *地球物理*, **2**, 1-23.
- 野満隆治, 山下 馨 (1943): 井戸理論の一進展 (第 2 報) 豎井の揚水開始及び停止に伴ふ附近水位変化と地層の弾性率. *地球物理*, **7**, 21-24.
- 大上和敏 (2006): 温泉沈殿物から温泉の変遷過程をたどる. 大沢信二編「温泉科学の新展開」, 149-172, ナカニシヤ出版, 京都.
- 大上和敏, 大沢信二, 中川理恵子, 高松信樹, 由佐悠紀 (1997): 別府血の池地獄の色彩変化に関わる沈殿物の鉱物組成・温泉水の化学組成の変化. *温泉科学*, **47**, 56-67.
- 大沢信二 (2004): 青い温泉水はどのようにしてできるのか. 西村進編「温泉科学の最前線」, 5-21, ナカニシヤ出版, 京都.
- 大沢信二 (2006): 別府温泉は何歳か?—別府地熱系の年齢と熱水の起源—. 大沢信二編「温泉科学の新展開」, 149-172, ナカニシヤ出版, 京都.
- 大沢信二, 由佐悠紀, 北岡豪一 (1994): 別府温泉南部地域における温泉水の流動経路. *温泉科学*, **44**, 199-208.
- Ohsawa, S., Kawamura, T., Takamatsu, N. and Yusa, Y. (2000): Rayleigh scattering by aqueous colloidal silica as a cause for the blue color of hydrothermal water. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 49-60.
- Ponting, H.G. (1911): In *Lotus-Land Japan*, Macmillan Co. Ltd, London.
- (注) 長岡祥三訳「英国人写真家の見た明治日本: 講談社学術文庫 (2005)」には, 鉄輪での入浴の写真があるが, 記事が略されている.
- 瀬野錦蔵 (1941): 地温のみによる温泉の可能性について. *地球物理*, **5**, 216-222.
- 鈴木政達 (1937): 別府附近の地史と温泉脈. *地球物理*, **1**, 6-19.
- 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.
- 依田和四郎 (1937): 由布院温泉地帯の地温分布. *地球物理*, **1** (4), 285-304.
- 吉川恭三 (1964): 別府市宮地嶽神社温泉井の水位および泉温の変化について (2) 水位の年変化とその温泉湧出量との関係. *温泉科学*, **15**, 30-41.
- 吉川恭三 (1972): 別府温泉の地下構造 (1). *大分県温泉調査研究会報告*, **23**, 1-10.
- 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.
- 吉川恭三, 山下幸三郎 (1959): 温泉の揚水試験に関する一考察水. *温泉科学*, **10**, 98-109.
- 吉川恭三, 由佐悠紀 (1976): 別府温泉の現況調査 (3) 別府全域の噴気・沸騰泉と一般温泉. *大分県温泉調査研究会報告*, **27**, 1-15.
- 吉野 裕 (1969): 風土記 (東洋文庫), 平凡社, 東京.
- 湯原浩三 (1964): 別府周辺噴気孔の噴出熱量と熱力学的性質. *大分県温泉調査研究会報告*, **15**, 15-

25.

湯原浩三, 瀬野錦蔵 (1969): 温泉学, 地人書館, 東京.

湯原浩三, 江原幸雄, 原 幸, 藤光康宏 (1987): ヘリコプターより観測した九州の火山・地熱地域の熱映像. 日本地熱学会誌, **9**, 307-355.

由佐悠紀 (1979): 別府温泉南部域の化学成分長期変化について. 大分県温泉調査研究会報告, **30**, 10-18.

由佐悠紀 (1984): 温泉水採取にともなう地下温泉水系の変化 (2) 別府温泉南部域における塩素イオン濃度の低下と地下温泉水層の水理学的特性. 温泉科学, **34**, 92-104.

由佐悠紀 (1987): 温泉の流動と賦存一温泉開発の影響に関する考察一. 温泉科学, **37**, 161-168.

由佐悠紀 (1989): 別府温泉における近年の変化, 地熱エネルギー. **14**, 28-36.

由佐悠紀 (1996): 温泉の起源 (塩素の起源に関して). 温泉科学, **46**, 105-108.

由佐悠紀 (2009): 温泉現象の地球科学的研究の過去・現在・未来. 温泉科学, **59**, 166-168.

由佐悠紀, 川村政和 (1971): 化学成分からみた別府市中央部の温泉. 大分県温泉調査研究会報告, **22**, 55-65.

由佐悠紀, 神山孝吉, 川野田実夫 (1989): 別府温泉南部域の化学成分長期変化について (2). 大分県温泉調査研究会報告, **40**, 21-29.

由佐悠紀, 北岡豪一, 神山孝吉, 竹村恵二 (1994): 掘削による地下温泉水の層構造の検出一別府温泉南部地域での試み一. 温泉科学, **44**, 39-44.

由佐悠紀, 野田徹郎, 北岡豪一 (1975): 地熱地域を含む温泉地からの流出水量, 熱量および化学成分量一別府温泉の場合一. 温泉工学会誌, **10**, 94-108.

由佐悠紀, 大石郁朗 (1988): 別府温泉の統計一昭和 60~62 年における採取水量および熱量. 大分県温泉調査研究会報告, **39**, 1-6.

由佐悠紀, 大沢信二 (2000): 別府温泉の年齢. 大分県温泉調査研究会報告, **51**, 1-9.

Yusa, Y. and Ohsawa, S. (2000): Age of the Beppu hydrothermal system, Japan. Proc. World Geothermal Congress 2000, 3005-3008.

由佐悠紀, 大沢信二, 北岡豪一 (1996): 伽藍岳の地熱調査 (2). 大分県温泉調査研究会報告, **47**, 7-11.

由佐悠紀, 大沢信二, 北岡豪一, 竹村恵二, 福田洋一 (1995): 伽藍岳の地熱調査. 大分県温泉調査研究会報告, **46**, 5-13.

由佐悠紀, 大沢信二, 北岡豪一 (2002): 別府温泉における温泉水系の変動. 大分県温泉調査研究会報告, **53**, 1-11.

Yusa, Y., Ohsawa, S. and Kitaoka, K. (2000): Long-term changes associated with exploitation of the Beppu hydrothermal system, Japan. Geothermics, **29**, 609-625.

由佐悠紀, 田籠功一 (2001): モンゴル・バヤンホンゴル州のシャルガルジュート温泉について. 温泉科学, **51**, 51-61.