

別府温泉の生成過程と

温泉資源の有効利用・保全

京都大学大学院理学研究科

附属地球熱学研究施設

由佐悠紀

一 別府地域の地質構造と温泉

大分県における最初のまとまった形の地質図は、明治二九（一九〇六）年に地質調査所から出版された「大分県20万分の1地質図幅」です。

この地質図には、大分県の地質は県北・中央部・県南の三つに区分され、県南の地質は先第三紀の古い岩石から成り、大分と久住を結ぶ線より北には第三紀以降の火山岩が多く、由布・鶴見岳は角閃石安山岩で、輝石安山岩は台地状地形を作っている、というような記載がされていて、現在の知識のある部分は、この時点で基礎ができていたと言えます。

その後も、多くの研究者が他面にわたる地質調査を行

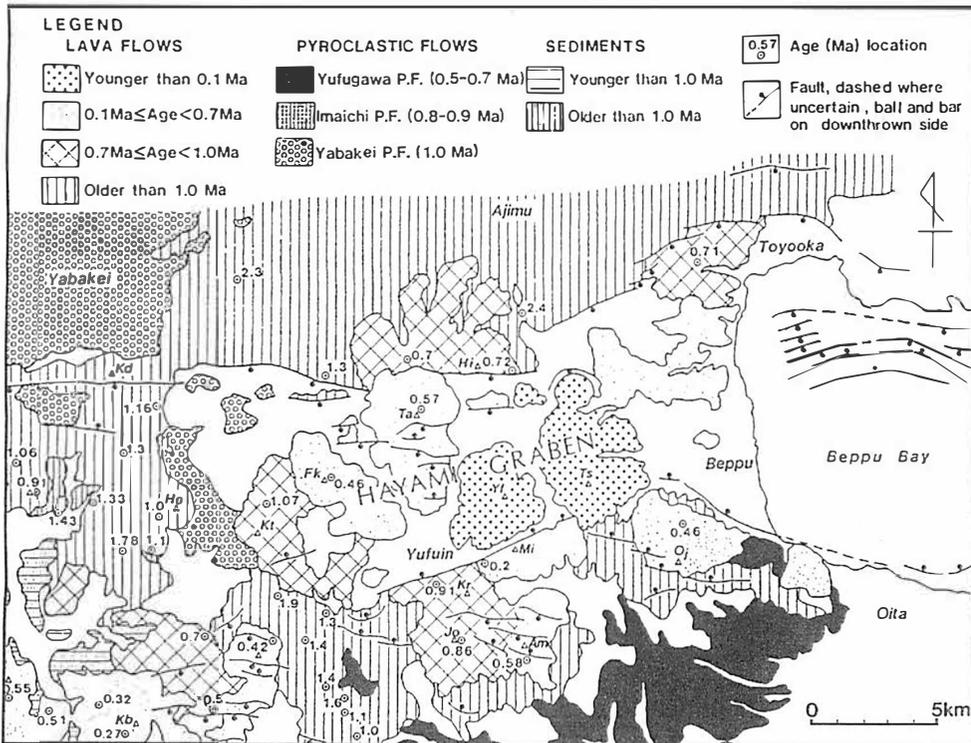


図1 別府地域の地質と火山岩の噴出年代。1Maは100万年前を示す。
[鎌田(1989)による]

いましたが、別府地域に関する総合的な報告は、昭和八(一九三三)年発行の別府市誌に掲載された鈴木政達氏(京都大学助教授：京都大学地球物理学研究所)の記事です。鈴木氏はまもなく病没されましたが、この記事は、昭和十二(一九三三)年に京都大学地球物理学教室から発行された学術誌・地球物理の冒頭を飾る論文として再録されました。

その中では、地質・地殻変動から温泉活動までが論じられており、別府はもとより九州中部地域における地学研究の指針の役割を果たしたとも言えます。その後の研究により、修正や発展がありました。その内容の多くは今なお通用するものですので、少し長くなりますが、この論文の冒頭を引用しておきます。

別府地区は、本邦火山活動史上に於て、由布鶴見火山群として知らるる一火山地区にして、国東、九重、阿蘇、雲仙等の諸地区を含む九州中部の火山地帯の一部を成すものなり。九州中部に火山活動の強烈なりしは、此地が西南日本に於ける三大火山帯たる山陰(南日本内側)、瀬戸内、霧島の三系の相交又する所に當り火

山活動の勢力が此所に集中せられたるに因るものにして、その活動の時期は地質学上の第三紀末葉より第四紀に渉れるものなれども、第四紀に入りて後、最も強烈を極めたるものにして、其特徴とも見る可きものは、区域内に渉り、活動の中心が、種々に移動したるものにして、多くの火山群の発生を見たるにあり、而して論下の由布鶴見火山群は乃ち其一局を示すものなり。

先に触れた修正や発展としては、地質分布が精密化され、また各種火山岩の噴出年代が求められたことが挙げられます。加えて、別府から雲仙に至る九州中部の火山地帯は古い基盤の沈降帯であること、また、この地帯を境にして九州島が南北に離れる運動をしていることが、重力調査・ボーリング調査・長期にわたる土地の測量などによって明らかにされました。

今日、この火山地帯は別府―島原地溝などと総称されていますが、現実には、溝どころか九州の屋根とも言ふべき山岳地帯です。これらの事実は、最近二〇〇万年の間(第四紀)、別府を含む九州中部では、基盤の沈降と火山活動による新しい土地の形成が同時に進行してきた

ことを意味しています。

こうしたダイナミックな動きは、地球全体の動態と関わっていると考えられています。巨視的に見れば、地球の表面は十数枚の岩盤の板(プレート)から構成されており、それらの板の相対的な運動によって、地震(断層活動)・造山運動・火山活動などが引き起こされると解釈され、この考えをプレートテクトニクスと言います。

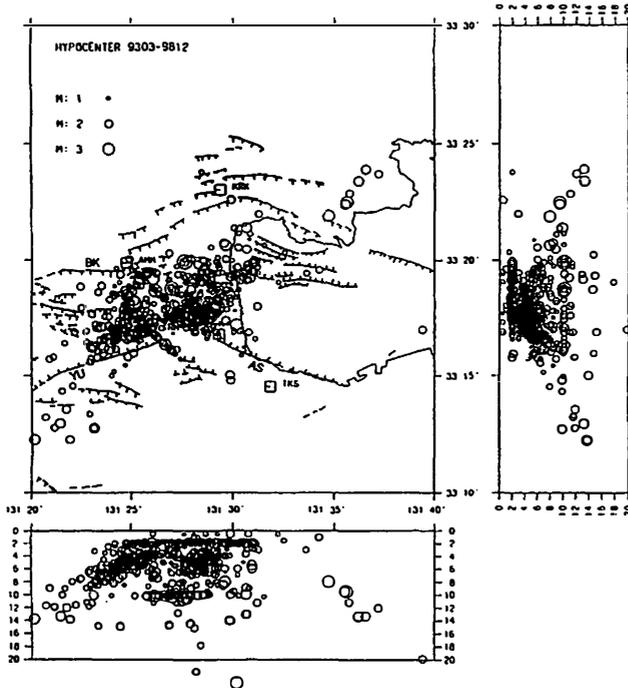


図2 別府地域の震源分布(1993年3月~1998年12月)
Mはマグニチュード、線群は代表的な断層
(毛羽を付けた側が落ち)

九州島は、アジア大陸を乗せるユーラシアプレートの東縁辺部に位置しています。この下に、東南方向から押し寄せてくるフィリピン海プレートが沈み込んでいます。この運動のために土地はストレスを受けて引き裂かれ、また、プレートが100キロメートルほど沈み込んだ深さ付近で、マグマの素が生成されます。

別府地域はまさに、そのような場所に当たります。頻発する地震、由布鶴見火山群、そして豊富な温泉は、地球のダイナミズムの現れです。

別府地域における本格的な温泉研究は、大正十三年一月、京都大学地球物理学研究所(現、地球熱学研究施設)が開設され、温泉分布などの現地調査から始まりました。先に紹介した鈴木氏の論文には、自然状態での源泉の分布が示されています。他方、明治十年代あるいは二十年代には、上総掘りによる温泉井掘削(湯突き)が始まり、明治末までに、現在の別府温泉域では1000本にも達する温泉井が掘削されました。第一次温泉掘削ブームと言えます。

時代が下がり、昭和三十年代後半から四十年代前半にかけて、わが国の経済成長に伴い、第二次温泉掘削ブー

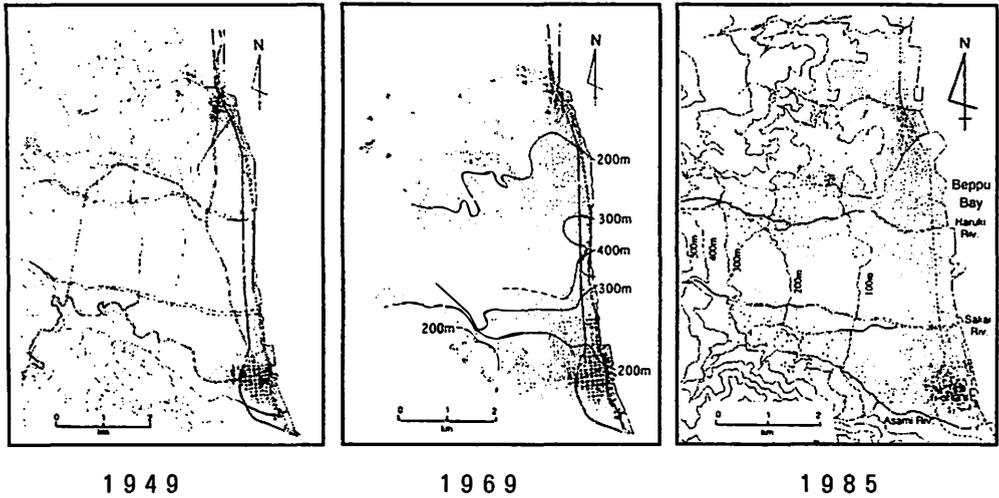


図3 別府温泉における泉源分布の変遷；現在の分布は1985年とほとんど同じ。

ムが到来しました。

およそ十年間の間に、毎年一〇〇本に登る温泉井が掘削されて源泉数は倍増し、その総数が三〇〇〇本に近づいた時期もあります。これは、日本全国の源泉数の十五％程度に相当しますが、現在実際に使われている源泉数は二三〇〇本程度と思われます。また、蒸気も含めた温泉採取量は、一日当たり約五万トンで、別府市における水道配水量とほぼ同じです。これらの温泉水や蒸気が運び出している熱量は膨大で、一年当たりざっとマグネシウム七の地震五個分に相当します。

東西約五キロメートル・南北約八キロメートルという限られた範囲に、多数の温泉井が掘削されたことにより、別府温泉の全貌が明らかになりました。全体的に温度が高いこと、泉質の種類が多いこと、噴気・沸騰泉・一般的な温泉というように湧出形態が多様なこと、そしてそれらの地理的な分布に規則性があること、などが別府温泉の特徴です。

そうした特徴から、別府温泉の生成メカニズムも分かってきましたが、これは全世界の火山地域に見られる温泉現象のモデルとも言えるものです。紙数が限られています。

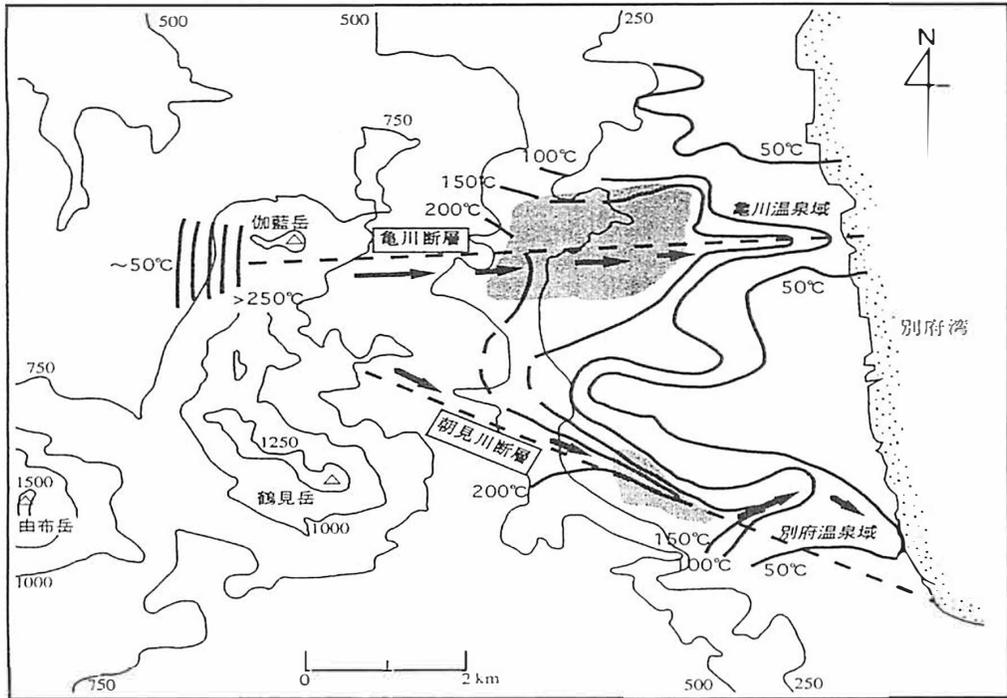


図4 別府温泉の概略図、太い曲線は海面下100メートルにおける等温線(°C) 影の部分は蒸気存在域、太い破線は断層、矢印は食塩型熱水の流動径路。

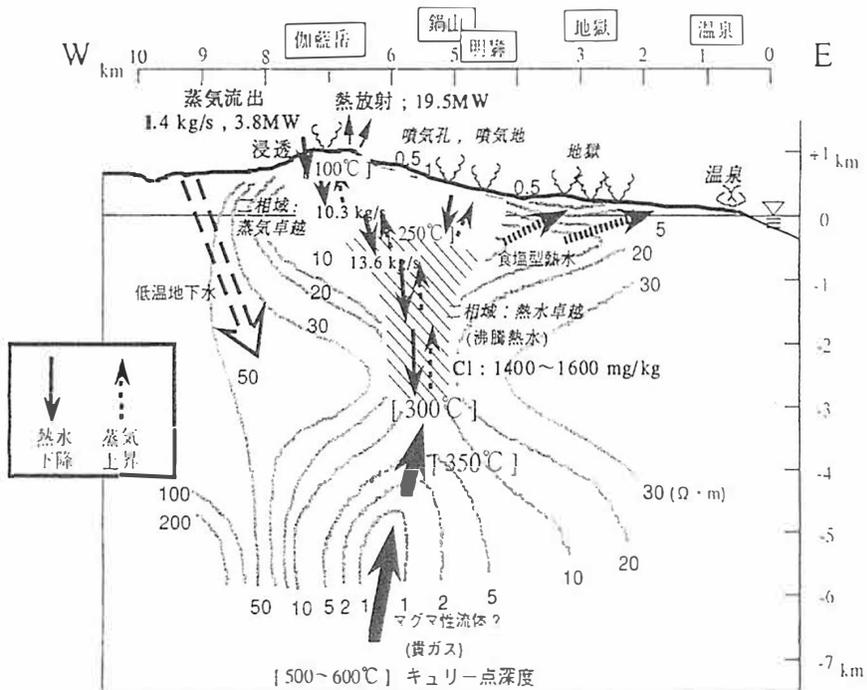


図5 亀川断層に沿う地下の模式的な断面図。

すので、極く単純化すれば、別府の多種多様な温泉は全て、鶴見火山群の地下に存在する食塩型の熱水（二五〇〜三〇〇℃：塩素イオン濃度一四〇〇〜一六〇〇mg/l）から生じています。この熱水が、北部の亀川断層と南部の朝見川断層に沿って流動し、途中で蒸気を発生させたり、浸透水によって希釈されながら、海岸に向かって流れています。また、この途中で地層の岩石類と化学反応を起こします。このようなプロセスによって、多種多様な温泉が出来上がっています。

この豊かな別府温泉のシステムがいつごろ形成されたのか？興味ある問題ですが、温泉水は流れて消えていくものですから、それを見積もる方法はありませんでした。

昭和六十三（一九六八）年に、野口原の京都大学地球熱学研究施設構内で深さ三〇〇メートルの井戸が掘削され、いくつかの新知見が得られました。その一つが、この間に答える手掛かりです。地下の温度は深い所ほど高いのが普通ですが、この井戸では、二五〇メートル付近で最高温（一五〇℃）になり、それより下ではかえって低くなります。この高温の場所には、鶴見岳の地下にある食塩型熱水によく似た温泉水が流れています。

そして、その岩石の成分は、カリウムの濃度が通常の岩石の四倍もあることが分かりました。これほど多量のカリウムが温泉水から沈殿するまでの年数を見積もったところ、約五万年となったのです。つまり、別府に温泉のシステムが出来てから、少なくとも五万年は経っていると解釈されました。

この五万年間に流出した温泉水量は大変な量ですが、これは浸透した雨水であることが明らかにされています。言うことは、たとえば一日当たりの温泉水の量には、限度があることを意味しています。ごくおおまかには、一日当たりどんなに多くても、十万吨です。先に、現在の一日当たりの採取量は五万吨と書きましたが、見積もりの精度を考えると、ほぼ限度に達していると思われるべきと思われます。

温泉は別府の基盤をなすものですから、温泉資源の保全をもっと身近な問題として考えていかななくてはならないと思います。他方、温泉水とともに流出した化学成分の量も膨大です。その基本となる塩素は、どこから来たのでしょうか？これから解明しなければならぬ、学問上の大きな謎です。

二 明治以降の温泉利用の展開

地球上で最も活動的な温泉域の一つである日本列島の中にあって、九州島の中央部を占める大分県は、とりわけ温泉に恵まれている。ここに住まいした人々は、太古から連綿と、その恵みを受けてきたに違いない。

奈良時代に成立した豊後風土記の日田郡・直入郡・大分郡・速見郡の項に温泉や鉱泉の記述がなされていること、また伊予国風土記（逸文）に速見郡の温泉（別府温泉）にかかわる記事があることは、その証左である。

長い年月が過ぎ、明治以降、わが国は近代化への道を歩み始めた。その影響は温泉にも及び、温泉観光都市へ発展しようとする別府において、明治二十年ごろ、湯量の増大と新しい温泉場を求めて、人力と孟宗竹の弾力を利用した「上総掘り」による温泉井の掘削（湯突き）が始まった。湯突き

きは明治三十年代に最盛期を迎え、明治四十四年（一九一一）年には、当時の別府町（大字Ⅱ浜脇・別府）だけで、自然湧出泉十七口に対し、掘削泉は五百七十六口に

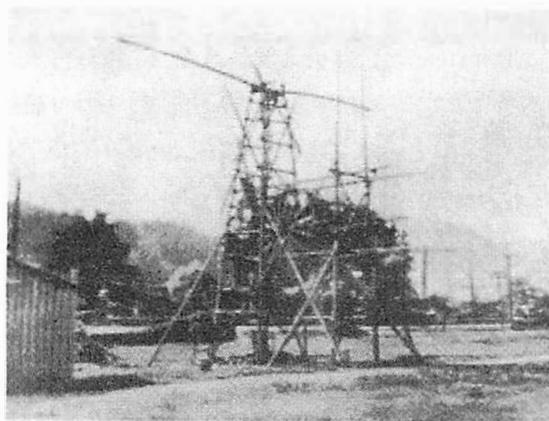
も達した。

この温泉井掘削は、温泉に対する人々の考え方を一変させた。それまでの温泉は「自然にわき出る」ものであったのに対し、「人為的に取り出すことが可能な」温泉もあることを知ったのである。

こうした知見を得ると、人間は、それに沿う行為を積極的に推進しようとする。

ここに「温泉開発」という概念が発生した。これは後年の「地熱開発」にもつながるものであり、別府における湯突きは、そうした概念の発生・展開にあずかった、世界でも最初期の開発行為であった。

その後、恐慌と戦争の時代が続く。温泉は、その影響を大きく受け、大分県に限らず、わが国はもとより世界的に、温泉・地熱の開発・利用に新たな展開はほとんど無かった。



昭和初期の温泉掘削「上総掘り」

自然の恵み・温泉を享受できるようになったのは、第二次世界大戦後の昭和二十年代に入ってからであり、社会の安定化・経済成長・生活様式の多様化とレベルの向上に呼応して、全国的に温泉開発が進み、今に至っている。

大分県でも、火山地域に展開する古くから有名な温泉地（別府・湯布院・九重地域など）でさらなる開発が行われた。

加えて、新しい火山活動が無く、温泉は出にくいとされていた県北や県南地域でも、千メートル前後、あるいはそれを超える深い掘削が行われ、十分に利用可能な温泉が得られている。

その代表的な例は大分川の中・下流域であり、新しい温泉地の出現を目的の当たりにすることのできた、稀有な出来事であった。

中でも昭和五十三（一九七八）年ごろから開発が本格化した大分市では、およそ二十年間に百八十口に達する温泉井が掘削され、今や全国でも有数の非火山性温泉地となっている。

こうして、平成十（一九九八）年三月現在、県内三十

五市町村に温泉があるまでになった。総源泉数は四千七百五十三口、採取される温泉水量は一分間当たり約二十六万リットル。これらはそれぞれ、全国の一八・四%および一〇%に当たる。国土総面積の二%にも満たない大分県に、これほど多数の温泉が集中しているのである。

そして、これらの源泉の多くが個人所有であること、すなわち、大分県における温泉開発の大きな部分が私的な資金（努力）によってなされてきたことは、注目されなければならない。

温泉の主な利用法が入浴であり、温泉を備えることが旅館・ホテルの大きな魅力であることは、昔も今も変わらない。各温泉地の民宿は、古来からの湯治場の役割を受け継いでいる。

また、開発形態を反映して、大分県では自家用温泉や住民の組合によって管理・運営されている温泉が多い。公的資金による整備や開発も、近年盛んに行われるようになった。たとえば、湯布院温泉地（湯布院町）、長湯温泉地（直入町）、鉄輪・明礬・柴石温泉地（別府市）は、環境庁から「国民保養温泉地」として指定されており、これらの地域を中心に温泉施設の整備が進んだ。

他力、温泉のエネルギーを入浴以外にも利用しようとする試みもなされている。地獄の蒸気や熱水を用いた料理（豊後風土記に既にその記述がある）、暖房、農業や園芸（温室の熱源）、養魚などである。

別府・明礬での湯の花製造は世界的に珍しいものであり、別府の地獄が貴重な観光資源であることは言うまでもない。

三 温泉利用と地熱開発

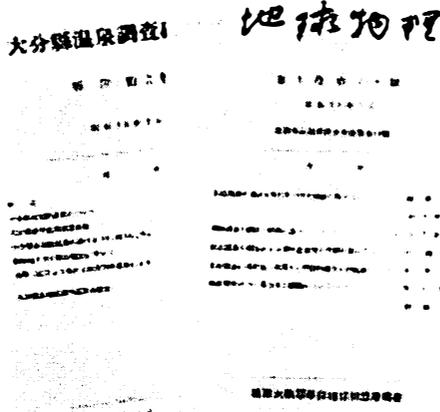
広い意味での温泉の利用法として、地下深部にある高温流体のエネルギー（地熱エネルギー）を用いた地熱発電がある。

わが国における最初の試みは、大正七（一九一八）年七月、海軍中将山内万寿治氏が別府市の坊主地獄付近で開始した上総掘りである。翌八年四月、二十四メートルの深さで、噴出温度一一三度の蒸気を得た。

山内氏の病没後、この井戸は東京電灯株式会社（現東京電力）の太刀川平治氏に受け継がれ、大正十四（一九二五）年に一・二二キロワットの発電に成功した。これ

が、わが国における最初の地熱発電である。

次いで太刀川氏は、昭和二（一九二七）年、玖珠郡飯田村（現九重町）湯坪において八十四メートル深の掘削をし、一四五度の強勢な蒸気を噴出させたが、諸般の事情のため発電までは至らなかった。現在、この井戸の二代目が、同地の京都大学地球熱学研究施設・飯田観測所に健在である。



京大地球物理学（現熱学）
研究施設の温泉研究報告誌

第二次世界大戦後、壊滅的であった電力の復旧とエネルギー資源開発の一環として、地熱エネルギー開発が国の施策として採り上げられた。

工業技術庁は、昭和二十六年（一九五二）年七月、別府市南立石

において三〇キロワットの地熱電力に成功した。これにより地熱発電の実用性が確認された。

これを契機に、九州各地の温泉・地熱地域で調査が実

施され、昭和四十二年（一九六七）年八月、九重町の九州電力大岳地熱発電所が営業運転を開始した。岩手県の松川地熱発電所に次ぐ、わが国で二番目のものである。

その後、徐々に地熱開発が進んだ。現在、大分県には、九重町に四基、別府市に一基の地熱発電所があり、それらからの総出力は約一五万キロワット、全国の地熱発電量の約三割を占めている。

他方、温泉は科学研究の対象である。大分県の温泉の理学的研究は、大正十三（一九二四）年十二月、別府市野口原に京都大学地球物理学研究施設（現地球熱学研究施設）が開設されて始まった。むしろ、これによって、わが国における地球科学的な温泉研究が本格的に開始されたと言ってもよい。

最初の成果は、昭和八（一九三三）年に発表された地質学的研究である。別府地域の火山岩分布と温泉脈の概要が明らかにされ、火山活動史と地殻変動が論じられた。基本的な内容は現在も通用し、中部九州を境に九州島が南北に離れているという見解の先駆けをもなす記念碑的な論文である。

また、施設開設とともに別府温泉の総調査が実施され、

昭和十二（一九三七）年に取りまとめられた。これにより、初めて別府温泉の実態が明らかにされた。類似の調査は現在も継続して行われており、研究の基礎資料となっている。

一方で温泉のゆう出量や温度変化のメカニズムが研究された。ほとんどの温泉が自噴していた時代に得られたデータは、非常に貴重なものであり、その解析のために展開された理論は、地下水学の基礎理論となっている。

医学的な研究は、わが国で初めての温泉に関する治療研究施設として、昭和六（一九三一）年、別府市鶴見原に九州大学温泉治療学研究所（現生体防御医学研究所）が開設されることにより、本格化した。リウマチ性疾患・消化器疾患・皮膚病・創傷への温泉の効果、内分泌系・自律神経系・免疫系への影響などが研究され、得られた成果は温泉治療に大きく貢献している。

温泉開発が進んだ結果、温泉の枯渇現象（湯量の減少・泉質の変化・温度の低下など）が程度の差こそあれ、全国の少なからぬ温泉地であらわになってきた。

昭和二十三（一九四八）年、国は温泉の保護と適正利用を骨子とした温泉法を施行し、大分県はこれを受けて、

二十四年に大分県温泉条例を施行した。

その具体化（温泉行政）に当たっての科学的根拠を得ることを目的として、二十四年七月、大分県温泉調査研究会が設立された。メンバーは、学識経験者・県および関係市町村の代表者・関係行政庁の吏員からなる。

初期の主な事業は温泉井間の相互影響調査であり、これに基づいて温泉井の掘削基準が定められるなど、温泉行政によりどころが与えられた。

そうした行政のための調査が一段落すると、会の性格は時と共に変化し、学術研究を主体とするようになった。研究分野は地質学・地球物理学・地球化学などの理学的なものから農学・薬学・医学・法社会学まで、多岐にわたっている。

得られた成果をまとめた報告書は、設立以来途切れることなく、毎年刊行されてきた。火山性温泉の生成メカニズムをはじめとする多様な内容の成果をここで紹介する余裕はないが、平成十二年刊行の第五十一号までに発表された論文や報告は四百三十編を超え、全国でも類を見ないユニークな研究団体として、その研究内容と共に評価されている。

別府温泉の起源

『五万年』説（編集部）

別府野口原所在、京大地球熱学研究施設の由佐悠紀教授らの研究で、表題のこんな推定結果が出た。昨年（二〇〇〇）年十月十九日、地元紙「大分合同新聞社」で発表され、県下の温泉関係者に大きな関心を呼んだ。

本誌編集部では、同新聞社と研究代表者、由佐教授の了解を得た上で、同新聞の記事内容を紹介することになりました。

※ ※ ※

由佐教授らは、同研究所施設構成で地下三百メートルまでの掘削調査を実施し、岩石コアや温泉水の試料を採取した。その結果、深さ二百五十メートル以下の岩石で、カリウム濃度が異常に高いことが分かった。

別府温泉の熱水は、地下二百メートルから三百メートルを流れていることから、濃度の高さは熱水が長期間流れることで、熱水中のカリウムが岩石に沈積したことが推測された。

由佐教授らは、このカリウム濃度に注目。別府地域の



熱水の滞留時間が七・八年との推定や下流域のカリウム濃度など過去の調査データなども利用し、熱水が通過した岩石と通過しない岩石との違いと、岩石を通過後の濃度低下などをもとに熱水通過の継続時間を算出した結果、「約五万年」という数字が出たという。

別府地域は、約十万年前の阿蘇火山砕流の流れ込みがないことから、すでに鶴見岳の山並みに囲まれる地形だったらしい。岩石研究からも約十万年前には鶴見岳の火山活動も終息していたことが推測されている。

由佐教授らは、鶴見岳の活発な火山活動の終わりを受け、約五万年前に熱水系の活動が始まったとみている。

由佐教授は、「地球の年齢（四十六億年）から見ると、ごく新しい温泉で、人間の歴史に近いものがある。豊後風土記に、別府温泉のことが記されるなど、今でも盛んに湯煙を上げる温泉を見ていると、旧石器時代の五万年前からの人間とのかかわりに興味深いものがある」と話している。

県内温泉総数は平成十一（一九九九）年度末現在で、四千七百七十八カ所と全国一位を誇っている。

このうち、別府市は二千九百四カ所で約六割を占め、

一大温泉地。八世紀の「豊後風土記」に「赤湯の泉」と鶴見山麓の温泉が登場し、早くから注目されていたことをうかがわせている。

泉都に警鐘

温泉利用量、ほぼ限界

(編集部)

一昨年(一九九九年、平成十一年)の「大分合同新聞」(四月十三日付)で、表題のような記事が掲載され、泉都の市民の大きな注目を集めた。新聞社と由佐教授の承認のもとで、再度その記事を掲げることにした。



温泉の保護対策を訴える由佐悠紀教授

※ ※ ※

世界第二位の湧出量を誇る別府市の温泉施設関係者の間で、資源として温泉を保護していこうとする動きがはじめている。湧出量からもみると、同市内の温泉使用量はほぼ限界に達しており、専門家も「市民一人ひとりが問題意識を持つべき」と警鐘を鳴らしている。

同市の京大地球熱学研究施設(施設長・由佐悠紀教授)によると、別府の温泉供給源は鶴見岳周辺のマグマだまり。雨水などが地下に浸透し、五十年ほどで「温泉」が出来上がる。降水量から計算すると、自然界の一日当たりの温泉生産力は六万から七万トン。一日の温泉採取可能量は約十三万トンとされる。別府八湯の全泉量がフル稼働すると、需要が供給を上まわる事態が生じることになる。

由佐教授は、温泉の使用量が自然界の供給を上回ると、低温の地下水が温泉水層に入り込み、温泉温度の低下や、泉質に変化が出てくる恐れが生じるという。また、由佐教授は、一九八六(昭和六十一)年の調査で、市内の一日当たりの使用量は、およそ五万トンという結果が出た。現在の使用量は、ほぼ限界といっている。将来は供給源

周辺の開発などで浸透率が下がることもあり得、使用制限や雨水の地下への浸透を防がない工夫を今のうちに考える必要があると警鐘を鳴らしている。

現在、泉源開発には県環境保全審議会による制限がある。六十年代の第二次温泉掘削ブーム以降、新規開発は年間数件単位で推移。乱掘開発による使用量の増加はすでになく、見られない状態。

市も、温泉資源の保護を掲げているが、経費の問題や市民の温泉に対する危機意識の低さがネックとなっているという。市温泉課は「使用制限や道路の材質変更、海抜八十メートル以上の地区での開発時に雨水浸透対策を盛り込む、などの保護対策があるが、豊富な湯量が目の前にあり「掘れば出てくるもの」が一般的な考え方になっており、実行に移しにくい状況」と説明する。

井上市長は「住宅開発などが進み、地下への雨水浸透が少なくなってきた。奥別府の植林などで、保水力を高めていかなければ五十年、百年後に温泉が枯渇することもあり得る。できる範囲で取り組んでゆきたい」と話している。

※ 温泉法の知識

(編集部)

別府温泉(別府八湯)と保護地区

別府市内には「特別保護地域」が三地域あります。南部・亀川・鉄輪の各地域で、この地域では、原則として新規の掘削は禁止されています。但し、代替掘削は認められています。

また、「保護地域」として南部・北部の二地域が指定され、この地域では、既設泉から一〇〇m以内の新規掘削は禁止されています。もっとも既設泉が噴気・沸騰泉の場合は、一五〇m以内は禁止です。

普通一般地域では、既設温泉から六〇m以内の新規掘削は認められません。

詳しいことは、県中央保健所(旧別府保健所)の温泉係で聴いてみて下さい。また、新規掘削を希望される方は、先に書いた保護地区に該当しているかどうか、どのような規制があるかを調べてもらいたいと思います。