

研究対象としての別府温泉

(地球物理学的見地から)

京都大学地球物理学研究施設 吉 川 恭 三

Progress of Research on Beppu Hot Springs from a Viewpoint of Geophysics.

Kyozo KIKKAWA

(Geophysical Research Station, Kyoto University)

1. ま え が き

別府温泉の特徴を一口にいえば、その規模の大きさである。別府でだけというような特別な現象は見当らず、別府のある地区での温泉の姿は日本中、他のどこかの温泉地にも共通のものである。そのように各温泉地でそれぞれ別々に見られる特徴を、一つの温泉地域で、一連の流動過程として現わしているのが別府温泉の特徴である。

規模の大きさはその泉源の多いことにも現われている。このように広い面積に多数の泉源が掘さくされている例は珍しい。これは、それだけ地下構造や温泉の流動をさぐるに資料が多いという研究上の非常な利点である。また、別府に京大地球物理学研究施設が開設されて以来、すでに40年をこえ、長年間の科学的資料が蓄積された。業績は、「地球物理」、「京大地球物理学研究所報告」、その他学会誌に多数記載され、「地学より見た別府」(別府市, 昭27)、「別府温泉史」(別府市観光協会, 昭37)にある程度まとめられている。

この資料の豊富さだけでも、温泉の機構をさぐるに別府にまさる温泉地はないといえる。ところがひるがえって考えると、さて何が分っているか確信を持っていえるものがなく、すべてがもう一步の連続にすぎない。ここに述べようとするのは、過去の業績に守られつつ前途の研究への問題提出の段階である。

温泉の研究には、各分野の研究者が接触しつつ、それぞれもっとも得意とする見方でその現象をとらえてゆくのが道である。しかし、その場合にどうしても、各分科の慣習的な研究方法にとらわれて他分野の資料の解釈が一方的となる危険をとまなう。標題に、地球物理学的見地から、とことわったのは、この文中で地質学、地球化学、または行政技術をふくめた諸問題に対し、なまはんな解釈を行っている点が多いに違いないと思うからである。しかし、研究対象をとらえる道程で、一度はこの危険をこえねばならない。ご批判、ご教示をお願いする次第である。

2. 温泉の発達

別府温泉は元来、別府八湯(浜脇, 別府, 亀川, 観海寺, 堀田, 鉄輪, 明礬, 柴石)と呼ばれる自然湧出地域を中心として発展したが、その後、温泉地域の拡大とともに泉源のほとんどは掘さく泉となり、現在、自然湧出泉はごく小数に限られている。その典型的な例として、ふつう別府温泉の代表とされている別府市街地における泉源掘さく深度の分布を図1に示す。大正13年より35年間にわたる期間中の3時期での温泉井の深度を10mごとに区分して、その各深度区間に属する井戸数をその時期で深度の分っている泉源総数に対するパーセントで表わし

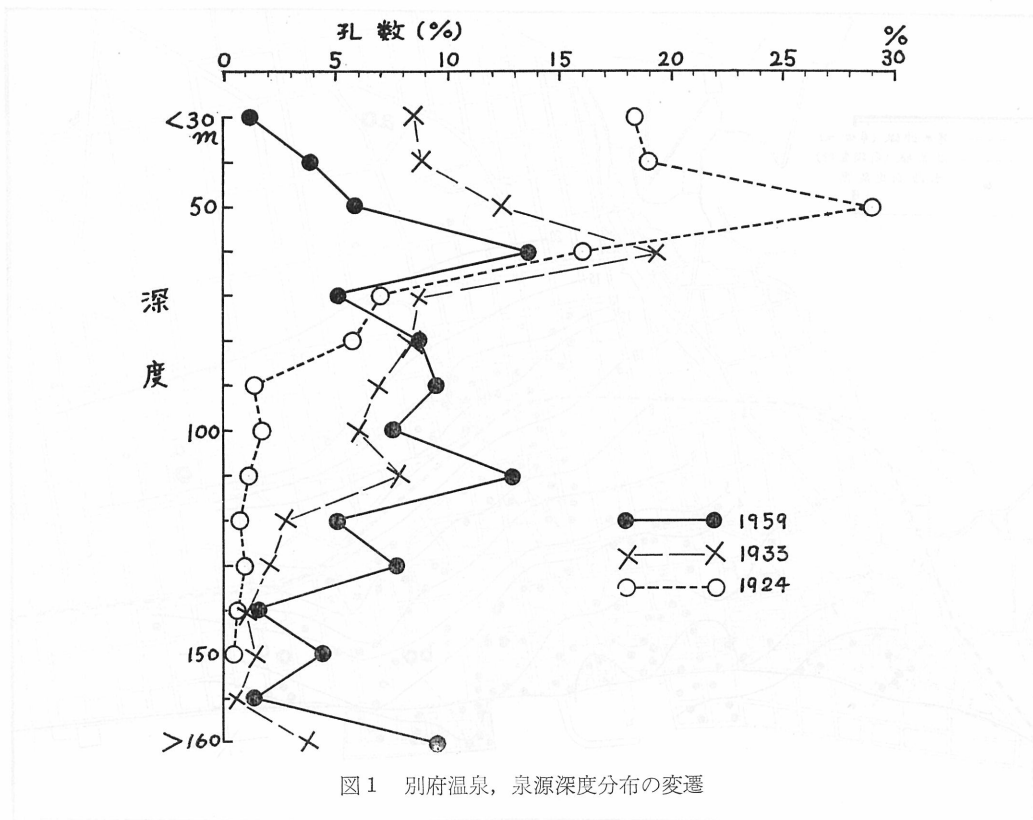


図1 別府温泉，泉源深度分布の変遷

た^{1,2)}。1924年より1933年に至る昭和初期に温泉掘さくが大いに進み、深度の深いものが増すとともに、30m以下のような浅い泉源がしだいに影を消してゆき、さらにその後も前期間の延長として、同様な深度増加の傾向が明らかである。

この図の1959年の結果で、各深度に対する孔数分布に二つのピークの現われていることは興味がある。すなわち、深度60mと110mの2箇所の孔数が大きく、この傾向はすでに1933年にあらわれかけていて、その後、110m深度の泉源の増加により非常に顕著となってきた。この二つのピークのもの語るものは何であろうか。

図2は、今、問題としている別府市街地で、1960年に温泉の静止水頭を測定した結果である³⁾。黒丸は水頭を測定した泉源で、この地域における活動湧出孔の約 $\frac{1}{5}$ にすぎないが、その分布は市街地全泉源の分布状態をほぼ表わしていると考えてよい。等水頭線の値は平均海面からの高さをメートルで表わしたものである。この図中に海岸から内陸に向け2本の鎖線を引き、(1)、(2)の番号を付した。これはかつて、野満らが地中温度の垂直分布から温泉脈と名づけた脈状地域を示すものである⁴⁾。この温泉脈は、ある深さで地温が急に高くなるような温度躍層を持つことで特徴づけられ、その位置から、(1)は田の湯温泉脈、(2)は海門寺温泉脈と呼ばれた。前者では躍層は非常に浅く、古来、自然湧出をしていた「開放泉脈」であり、後者ではほぼ70m深度前後に躍層があり、自然湧出を持たない「隠べい泉脈」とされた。この両鎖線をほぼ直角に切った断面での地中温度分布を転載したのが図3である。これによると、60°Cの温泉を得るのに、田の湯温泉脈でほぼ50m程度の掘さくで十分であるのに、海門寺温泉脈以北ではその

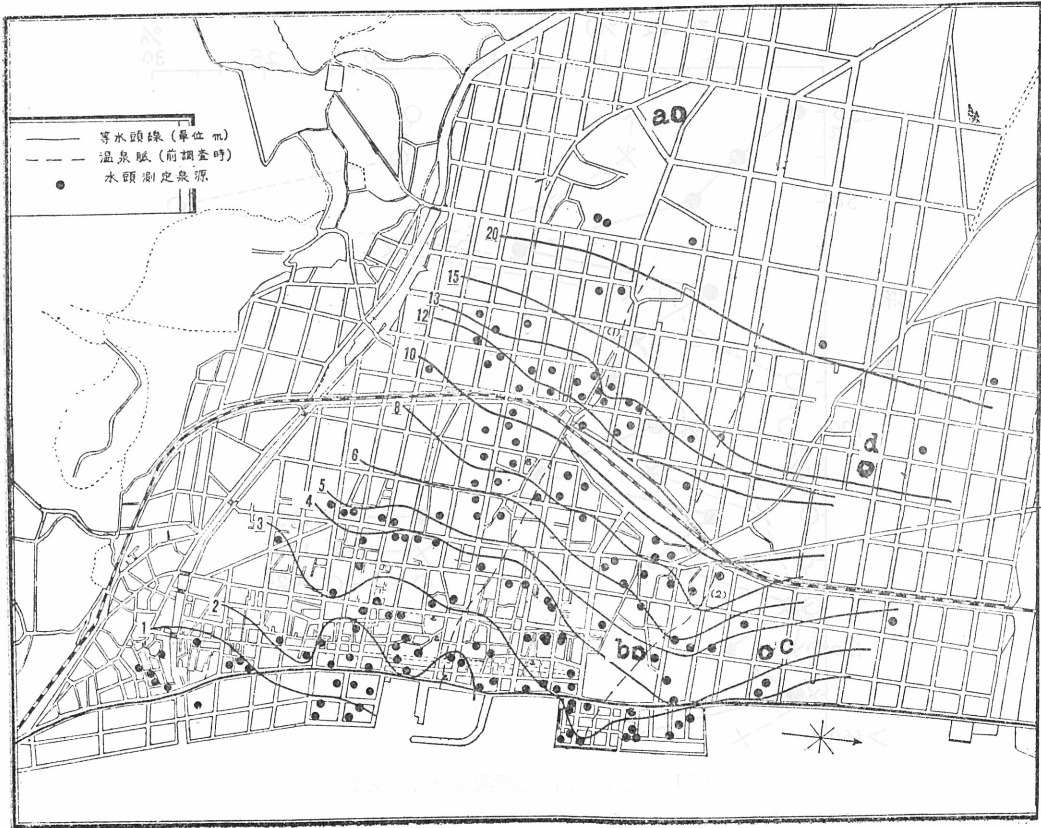


図2 別府市街地温泉の静止水頭分布 (1960)

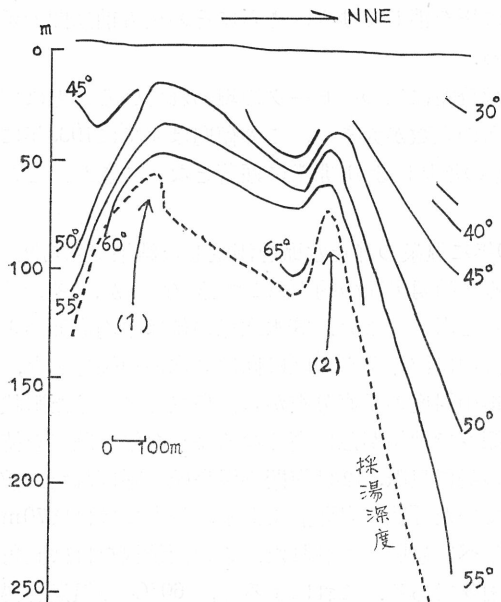


図3 別府市街地の地中温度分布 (野満隆治・山下肇による)

深度は急激に深まり、100m以上の掘さくを必要とする。これと、先の図1とをくらべると、深度に対する泉源孔数の二つのピークに対し、浅い60m深度に対するものは田の湯温泉脈附近の泉源、110m深度に対するのは海門寺温泉脈附近の泉源で、現在の別府市街地ではこの二つの温泉脈を中心として、泉源が一带に広がっている状態にあるとの説明が可能になる。

1924年の調査時には、市街地の最南部、浜脇の朝見川以南地区で活動泉源83孔であったのが、1959年には15孔にまで減っていた⁵⁾。これからも分るように、1924年の市街地活動泉源826孔はこの浜脇と田の湯温泉脈を中心とした南半部に密集していたが、昭和初期に至って海門寺温泉脈をはじめそれ以外の地点にも試錐が進められ、北半部における深い泉

源が増加してきた。その間、南部の泉源はしだいに衰え、1959年での総活動孔数は738とむしろ減少しているのにかかわらず、この35年間に泉源の位置はずっと北部にまで広がり、昔にくらべ泉源の地理的分布は市街地全般に平均化される傾向を示してきた。図1における井戸深度の増加傾向は、このような温泉利用域の拡大にともなう採湯施設の水平的な広がりによる効果が大きく、俗に別府温泉の泉源が北に移動しているといわれるのは、このような泉源分布の変動をさすものである。その後もこの泉源分布の拡大傾向は続いている。かつては地表まで自噴しないために比較的泉源の少なかった国鉄以西の山の手方面に掘さくが進み、揚湯を行う泉源が増加し、それらのうちには高温で沸騰泉となっているものもある。

もちろん、このほか、各井戸ごと、また各地区ごとでも掘さく深度は増加しており、海門寺温泉脈上のもっとも優勢な泉源地域でも平均深度は104mとなり、その海岸部では昭和24年に降に50m以上深度を増している⁶⁾。泉源分布が地理的に平均化されることは採湯量の地域的配分をうながすことである。そのため、採湯地域の拡大とともに、既存泉源域では増深や揚湯により採湯量の低下を防ごうとする。こうして、最初は自然湧出泉を中心とした温泉が、堆積層中を流下する温泉水をできるだけくまなく採湯できるよう、平面的にも立体的にもその泉源範囲を拡大してゆく。以上は別府市街地を例にとった採湯状態の変化であるが、これは温泉地の発展につれて現われる一般的な姿であり、温泉地共通の現象である。

3. 地質環境

別府市街地堆積層内の温泉については古くから多くの調査研究が行われ、それから推定されている地下状況の主なものは次の通りである。

(1) 一般に深いほど温度も高く、水頭も高い。温泉脈上では前記の如く温度躍層があり、その他ではほぼ直線的に昇温する。温泉脈でも海岸に近づくとも躍層が衰える。

(2) このように深度により、また地区的に温度や化学組成は異なるが、一部を除きそこにははっきりした不連続面はなく、全体としては被圧層状泉の性状を示しながら温泉水はまじり合える機会を持っている。

(3) したがって、温泉水は一般に水頭の高い深層から浅層へと浸出する傾向にあり、田の湯温泉脈上では浅層不圧地下水もかつては50°C程度の温度を持っていた。

このように被圧層状泉でありながら浅層へ温泉水の浸出する状態は、別府に限らず各地の温泉でしばしば見かけられる現象で、かつての自然湧出泉を中心に発達している温泉地では当然このような地下温泉水の上昇流が存在しそれにより、熱や化学成分が地表近くまで運び上げられているに違いない。瀬野⁷⁾はどの温泉地でも地中温度の深さによる増温率が深いほど小さくなる傾向を持つと報じているが、これは熱が地層の熱伝導だけでなく、温泉水の上昇により上向きに運ばれていると考えることにより説明される。したがって、井戸を掘り、ポンプで揚湯する人工的開発は、この地下温泉水の上昇流を助長する手段であり、新泉源の開発が既存泉源域に対し上昇流を増加させ傾向にあるか、または逆に、それを弱めさらに進んで下降流をおこすまでに至るかは、温泉地開発の可能性に対する大きいきめてである。

このような地下上昇流をおこす自然条件は何であろうか。これには、地下水の供給、流出に関係する地表水の性状など水理的条件のほか、温泉水の流動媒体としての地質が大きく影響する。多くの温泉地は、堆積環境から考えて不透水性粘土層をつくりやすい海岸とか、地質的に透水層を遮断する断層の近く、または他の水源からの地下水流との接触面である谷間など、水平流動のはばまれやすい場所の附近に存在し、このような地質、地形が上昇流の生成に必要な

な条件と考えられる。別府温泉発生の地といわれる別府八湯は、現在の別府温泉を限る南と北の断層線に沿い、その中でも液体としての湧出量の大きい浜脇、別府、亀川は海岸近くにあるとの条件をみだしている。

このように一般的な上昇流をおこす自然条件のほか、別府市街地というような比較的狭い地域で、前節に示したような地温垂直分布、ひいては採湯深度の大きく違う環境をつくる条件は何かということが長年の疑問であった。このような地下状態の違いが堆積状態の不連続に起因するとすれば、図2の温泉脈に示されるように、その不連続線が海岸から内陸に向う方向、すなわち、別府市街地の南を限る断層線にほぼ平行な方向に走っていることは何を意味するのか。市街地海岸部で450mの試錐でもまだ基盤に達しなかったといわれるように、この地域の堆積層は非常に厚いと考えられる。このような厚い堆積層で基盤の変動が比較的浅層の堆積状態にそう大きく影響するものであろうか。また、堆積の過程で基盤が次々と不連続に陥没してゆき、堆積環境の不連続をつくっていったとすれば、そのような新しい時期にまで地殻変動を継続した原因は何であろうか。

このような問題を考える一つの進路が最近、森山ら^{8,9)}により与えられた。森山は温泉試錐中のコアを調査し、堆積層内の礫につき、上層には角閃石安山岩のみ、下層には輝石安山岩のみというはっきりした境界のあることを示した。この調査はまだ進行中で、図2の範囲では、現在まで図中に白丸で示した、a, b, c, dの4点だけであるが、その不連続面の深さは、aで地下50m, bで70m, cで120m, dで110m附近である、なおこの上に調査孔をふやし全域にわたっての分布を知ることが必要だが、ここまでの結果でも、その境界の深さにかなりの違いがあり、とくに北に向かって非常に深くなる傾向が示され、これはこの図の範囲外のさらに北部の調査孔についても明らかである。この深さを図3の地中温度分布とくらべてみる

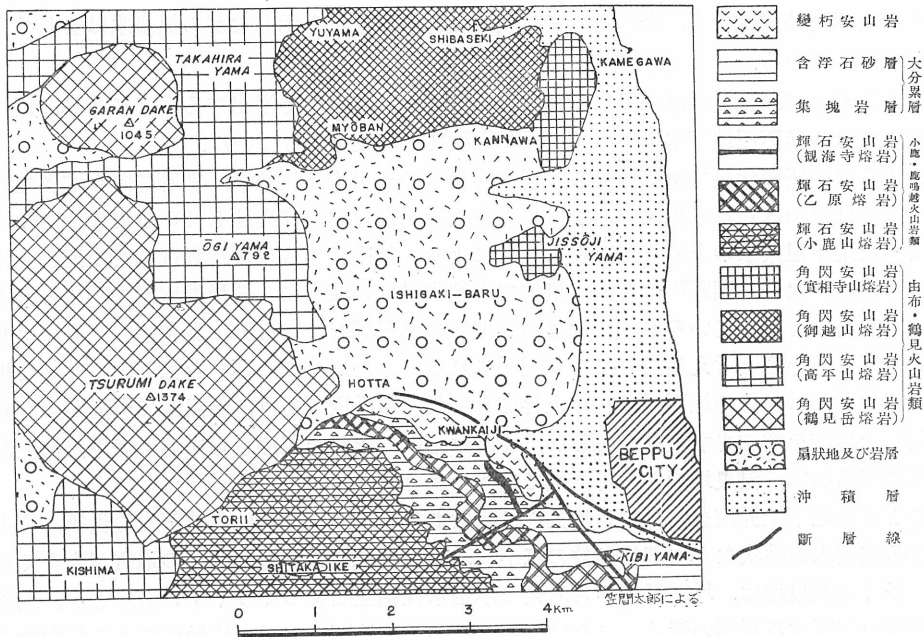


図4 別府市周辺地質図 (笠間太郎による)

と、その相似に注目される、田の湯、海門寺の両温泉脈で比較的浅く、それより北に向かって急激に深い。採湯深度から見ても、現在の採湯がほとんど下層の輝石安山岩系の堆積層から行なわれていることから、全般的に高温温泉水の主流は輝石系の砂礫中にあり、上層角閃石系透水層中では、浸透した地下水に下層からの温泉水が上昇、混合しつつ流れていると考えられる。このように、前記のような別府市街地での温泉採湯状態の違いは、大づかみには、輝石安山岩系堆積層の存在する深さの分布により説明されることは興味があり、それでは、堆積砂礫にそのような輝石系と角閃石系との不連続が生じ、またその不連続面が大きく傾斜している原因は何かが問題となる。

笠間による別府附近の地質図を転載したものが図4であり¹⁰⁾、輝石安山岩質溶石であらわされる早期火山活動は第4期初期に終り、その後の地殻変動で形成された地溝帯内に、更新世にいたり角閃石安山岩質マグマの後期火山活動が行なわれ、まず実相寺山、亀川西方の丘がつくられ、次に、御越山、高平山、鶴見岳の順に火山が噴出し、現在の地形がつくられたとされている。これによると、この中央地溝帯における堆積層につき後期火山の形成される以前には、地溝帯南北両側にあった輝石安山岩系火山からの堆積物が地溝帯を埋め、さらに更新世以後、後期火山が形成されて後、その浸蝕、堆積により、上層角閃石系堆積層がつくられたと考えてよい。しかし、別府市街地堆積層で見られたような、輝石系、角閃石系の境界が必ずしも後期火山活動の開始を表わしているとしなくてもよい。図から見られるように、別府市街地とくにその南部は、地形上からも、断層線以南の山からの堆積を受けやすい状態にある。したがって、現在の火山が形成される過程で何度かに分けて行なわれた山崩れによる堆積中、地溝帯中央部では新しい火山からの角閃石安山岩が堆積している間にも南部では断層線以南から崩れてきた輝石安山岩の堆積がなお続いていてもよいはずである。そのような古い火山の山形が安定し、あまり大きな崩壊をおこさなくなると、鶴見岳からの流出物とその堆積層の上部をおおっていったと考えると、市街地の北部ほど角閃石系堆積物の深いことがある程度了解される。しかし、その境界面の急峻な傾斜を今のような土砂流出経路の違いだけで説明できるとは思われない。森山によると、この堆積層で約100m以深の凝灰岩中に、炭化した植物化石(ヨシの類)が含まれており、この附近が当時の海岸近くではなかったかと想像される。我々はこの時代を確認し得ないが、約1万数千年前にヴェルム氷期が終って後、現在まで海面が約100m前後上昇したといわれていることと対照して興味のある問題である。輝石安山岩系堆積層の形成される過程で、恐らくは何回かの海侵、海退が行われたであろう。そのような海岸線の変動が堆積環境に与える影響がこの境界面の傾斜にどの程度作用したか今後の研究を必要とする。

次に、問題となるのが基盤の変動である。地溝帯の形成後もこの基盤は安定せず、次々と起った火山活動と関連して北側に落ちこんでいき、輝石系堆積層が北に傾斜したと考えられる可能性は大きい。実相寺山東部から亀川に近づくと300mの試錐でも、角閃石系砂礫のみで輝石系との境界は現われていない。これより深くに過去の輝石安山岩の堆積が存在するかは不明であるが、この附近の火山活動に前後して、かなりの沈下が起り、その後の堆積層が厚くなったとも考えられる。

以上のように、森山の調査結果は、堆積層中の温泉水流動状態へ新しい観点を与えたばかりでなく、今後、別府温泉の生成を考える上の足がかりを与えた。すなわち、従来の温泉の研究が、おもに、その流動する水試料に向けられていたのに対し、その水を伝える流動媒体の性質や生成状態をさぐることの重要性をさとらせたものである。前記のように、高温水がおもに

古い輝石安山岩系堆積層を伝わって流れてくる事実は、別府温泉の規模の大きさを考える上の一つの鍵であるに違いない。もちろん、温泉の熱源は新しい火山活動によるものであろう。しかし、そこでつくられた高温の熱水をむだに放出することなく、適当な温泉水にかえて運ぶためには豊かな堆積層の存在を必要とし、しかも、その上部は降雨の浸透をむかえる大きい透水性をもち、下部には温泉水のささえとなり、上昇流動をおこさせる比較的透水性の悪い地層が必要である。別府温泉を例にとった堆積層中の三次元流動については、今後もっと多くの研究が行なわれねばならない。

4. 泉源保護の問題点

各地の温泉で泉源の保護に多くの注意が払われている。一般に過剰揚水といわれるような温泉源への悪影響は、温泉中へ海水または冷地下水が浸入するという他水系の混入量増加として現われ、そのため、温泉は低温化し、また時に塩水化する。別府温泉でも海岸の一部に海水の浸入域があり¹¹⁾、また上流部の浅井戸がしだいに冷水化していった例¹²⁾が見られる。このような他水系の混入は温泉水との間の水頭勾配に比例して行なわれるものであるから、温泉源の保護には第一にその水頭を下げすぎないように留意されねばならない。しかし、一つの井戸からの揚水で、その揚水量と水頭低下量との間に1次関係のあることはよく知られており、1本の井戸で採湯量を増そうとすれば、それに比例して水頭の下ることはやむを得ない。そこで一温泉地で出来るだけ水頭を下げることなく採湯量を増そうとすれば、1本の井戸からの揚湯量増加をはかるよりも、井戸数を増すことによって総採湯量の増加をはかり、1本当りの採湯量はおさえるのが上策である。水頭低下の限界としては、その場所での浅い地下水面より下げないことを一応の目標とし、すでにそれ以下に下がっている所では、それ以上水頭を下げない努力が一般的に必要となる。

第2節に記したように、別府市街地温泉の発達ではこの井戸数増加の過程があてはまり、市街地全般を通じて泉源が網の目にはめぐらされ、上流から流れてくる温泉水をできるだけ余す所なく採りあげようとしてきた。その間、各泉源の井戸口径は2インチに保たれ、1口当りの平均湧出量は14 l/min (1959年調査)と、他の温泉地と比較してかなり低い値となっている。その静止水頭は1960年には図2に示される状態で、1938年以後の低下は2 m以内にとどまり、海水浸入域も1946年以降ほとんど変わっていない。このように、別府温泉は表面的にはかなり調和のとれた発達をしながらも、その中にいろいろな問題をふくんでいる。

泉源が密集していることは各泉源からの湧出量が平均化されていることであり、たがいに他を食いつぶしていることでもある。これがもっとも端的に現われるのは新泉源の掘さく時で、この問題については、瀬野、山下が揚水試験による相互関係を調査して以来¹³⁾、多くの調査、研究が積み重ねられ、吉川、山下は温泉地の揚水影響に関する新知見を得た¹⁴⁾。

温泉新規掘さくの適不適を考える時に、温泉法第4条にもとずき既存泉源への影響が重視され、揚水試験の試みられる場合も多い。その時、他泉源への影響度を知るのに、湧出量の正確な連続測定がむずかしいため、わざと試験中は他泉源の採湯をやめて、試験揚水による各井戸での水位変化を測定することも行われている。ところが実際に各泉源から採湯を続けている場合の揚水影響の伝わり方と、試験中採湯をやめている期間の影響の伝わり方とは根本的に違った状態にある。他が採湯をやめている場合は、揚水量だけの水量が揚水井にに向かって流れて来る状態であるのに対し、他から採湯を続けたままの状態では、揚水は他泉源からの湧出量を減少させ、遠方への揚水影響はその他の泉源の湧出量を食いつぶしたぶんだけ小さくなる。この効果は周囲

に食いつぶされる泉源の多いほど大きくなり、したがって揚水影響のとき方は小さくなる。この食いつぶし効果は泉源密度に比例し、外部浸出係数と名づけられた。これによると、別府市街地のように100m平方に10孔以上の泉源密集度だと、揚水井から100m離ればその影響は全くないといってもよい程度になる。逆にいうと、揚水井から100m以内の泉源で揚水量だけの湧出量減少が行われ、けっきょく、この範囲での総採湯量は新しい揚水によりほとんど増加しないといえるのである。この結果は温泉の揚水影響を考える上に多くの問題を投げかける。

一般に、揚水試験に当り、その周囲の既存泉源すべてにつき採湯量を余す所なく正確に測定することは泉源施設の複雑さのため不可能な場合が多い。そこで、たとえば1孔だけの湧出量変化を測定し、その結果揚水影響がほとんど認められなかったとしても、それでただちにその地区での採湯量にまだ余裕があるとは一がいにいえない。前記の通り、既存泉源が多ければ多いほど、1孔当りの揚水影響は小さいがその小さい各影響を泉源すべてに総計した総湧出量は新規揚水量に匹敵するほどに減少するのである。このため、温泉法第4条にいう温泉のゆう出量への影響という表現を、既存各泉源個々のゆう出量への影響ということと、その地区全泉源の総ゆう出量への影響ということとに区別して考える必要がうまれる。この二つの影響度は両立せず、むしろ相友する場合が多いのである。

たとえば、これまで一つの泉源しかなかった地区に新たに泉源が掘さくされたとすると、既存泉源への影響は大きいのが当然である。しかし、この新旧2泉源の湧出量を加え合わせたその地区での総採湯量は以前にくらべてかなり大きくなったはずである。一方、その地区に10孔以上の泉源の密集している場合、1孔づつへの影響は小さい。しかし、地区の総採湯量を増加させるという点からは新泉源は何の役割も果さない。この二つの場合、温泉法の趣旨をどう解釈すればよいか。恐らくは、前者の場合、訴訟に発展すれば許可基準が危くなり、後者の場合はそのまま何ということなく過ぎるのではないだろうか。温泉行政のむつかしさはここに端的にあらわれている。近頃、各温泉地で泉源の公有化、温泉の集中管理への道が開かれてきているのは、温泉源そのものが危くなったというよりも、このような行政技術上の困難さによる所が大きいと考えられる。

別府市街地温泉で、山下は泉源密度に比例する外部浸出係数のほかに内部浸出係数の効果を見出した¹⁵⁾。これは揚水による水頭の低下のため、深層からの温泉水上昇流が増加し、また従来浅層へ浸出して逃げ出していた量が減じ、けっきょくその泉源範囲に新たに加わる水量増加の効果を表わすものである。このような他水源よりの流入量の増加はその地区の総採湯量に対し揚水がどれだけの利益をもたらすかを示す重要な値で、温泉の開発余剰量の推定に役立つ。このような効果の少ない岩層割目の中の温泉では他泉源への影響が特に遠方まで現われる場合がある。しかし、この効果も外部浸出係数の効果と相対的に作用し、周囲に泉源が多く外部浸出係数の大きい所ほど、たとえ他の水源とつながっていても揚水によりそれから新たに供給される効果は小さくなる。別府での値から計算すると、100m平方当り2孔の泉源しかない場所での新規揚水では、揚水量の約5割は内部浸出で他から加わり残りの5割が他泉源の湧出量減少でまかなわれるのに対し、同じく10孔の既存泉源を持つ場所では、他から新たに加わる効果は2割以下にとどまり、8割以上は他泉源を食いつぶすだけとなる。

5. 熱水の供給

別府温泉の南と北を限る断層線に沿って、温泉活動の非常に活発なことはすでに記した。その両域の海岸部では液体としての温泉が多量に湧出しているのに対し、高地部には自然噴気孔

のみが散在し、試錐によっても水蒸気だけが噴出し、液体の温泉水を得ることがむつかしい。その両者の中間地帯に当る市街地の山の手とか、鉄輪を中心として亀川に至る間ではボーリングをすると高温水が沸騰しながら噴出する地域があり、沸騰泉地域といわれている。このような沸騰泉は化学組成に共通な特徴を持っており、一般に Cl^- 含有量が大きく ($0.5\sim 2.5\text{g/l}$)、それとほぼ等当量の Na^+ を含み、 Ca^{2+} が少ない¹⁶⁾。これは、登別温泉の地獄地域から流下して低地部温泉を涵養する第2次熱水¹⁷⁾として室住により指摘されたものと比較的好く似た組成であり、地熱地帯を通過した後の深層熱水の性格に共通性のうまれる機構を推定させる。別府温泉でも上流部一帯にある沸騰泉地域の地下にはこの形の熱水が存在していることは確かであるから、低地部温泉水の持つ熱量や Cl^- 量の大部分はこの熱水の流動混入により供給されていると考えるのは妥当である。山下と森はこの考から熱水供給量の推定を試みている^{18,19)}。

近頃、温泉利用施設の分布がしだいに高地部に向けて広がってゆき、それにつれて、沸騰泉域で直接熱水を採湯する泉源が増加した。沸騰泉で噴出熱水量を測定することが困難なため、このような泉源増加が地下熱水の流動状態に与える影響にはほとんど手をつけられていない。沸騰泉地域でも市街地温泉で見られたように、新泉源の開発は周辺の他泉源の噴出量を食いつぶしてゆくだけで、ある程度離れた所の流動状態にはほとんど影響を与えないものかどうかもはっきりしない、温泉源の保護を考える場合、この点はもっとも重要な鍵である。

市街地温泉においては、今後いかに泉源がふえたとしてもたがいに他を食いつぶしてゆくだけで、その総採湯量にはほとんど影響しないことが推定される。すなわち、泉源の新規掘きくは周辺小範囲の既存泉源の湧出量に影響を与えるだけで市街地全域へ流入してくる温泉水量への影響は無視できる程度であろう。したがって、市街地における影響の問題は各小地区ごとの既存泉源との干渉の問題にとどまり、温泉利用を集中させるか分散させるか、地域開発や将来計画など社会公益性の観点から論じられるべき問題である。

しかし、上流部で熱水の直接採湯量が増加する影響はこの市街地での問題とことなっている。従来、この種の熱水が自然に湧出して消費されていた例は海地獄、血の池地獄などごく少数にとどまり、その他はすべて人工的に井戸を掘ることによって始めて地表に噴出し得たものである。したがって、この採湯量の増加は沸騰泉地域内の相互影響にとどまらず、下流部の広い温泉地域に供給される Cl^- や熱量の減少をおこす可能性が大きいのではなかろうか。もちろん、これは熱水がどのような機構で、どの程度の速度で供給されるかの問題にかかってくる。湯原、友定はある仮定の下に地熱地域での熱水の存在深度やその水頭を推定した²⁰⁾。それによると、熱水の水頭は沸騰泉地域から山岳部に向け低くなる勾配を持っている。したがって、山岳部深層の熱水が沸騰泉地域や低地部の温泉にむけて流動して行くためには、水理的流動だけでは無理で、地下で沸騰をおこし、地層中を水蒸気と共に浅層まで上昇する過程が必要である。沸騰泉地域で採湯される熱水は一たんこの浅層まで上昇した後のものであることを考える時、採湯量の増加につれてこの熱水供給量も増加するとは考えにくい。したがって沸騰泉地域で泉源の増加と共に、現状程度の深さの井戸で沸騰噴出状態が長く維持されるだろうか、また、それにつれて下流部に供給される熱水量がいかに変化するかは温泉源保護に対する重要な問題である。

前記のように、他の温泉地でも沸騰泉にみられる熱水の化学組成が比較的好く似ていることから、別府温泉だけでなく、比較的高温で、 Cl^- と温度の間にだいたい1次関係の示されているような他の多くの温泉地でも、上流部でこのような熱水の流入が行なわれている可能性が考えられる。その熱水が現在も地下で作られているのか、または過去のものが貯溜されているだ

けかを問わず、化学成分を溶解した液体のまま深層から上昇して浅層の温泉水中に混入する熱水の流れの機構は温泉の生成や高温温泉の寿命の問題など温泉研究の全般を通じて今後の重要な課題となるに違いない。もし、先に記したように地層中での沸騰過程を経過しなければ混入し得ないようなものであれば、温泉への熱水の供給はかなり不安定なものと考えなければならぬからである。

文 献

- 1) 山下幸三郎：大分県温泉研究会報, No. 1, 29~46 (1950).
- 2) 矢野行雄：同上, No. 10, 40~43 (1959).
- 3) 瀬野錦蔵・吉川恭三：同上, No. 12, 23~30 (1961).
- 4) 野満隆治・山下馨：地球物理, 2, 233~259 (1938).
- 5) 首藤治郎・佐藤光一・矢野行雄：大分県温泉研究会報, No. 11, 22~26 (1960).
- 6) 佐藤光一・矢野行雄・末松竜雄：同上, No. 13, 28~30 (1962).
- 7) 瀬野錦蔵：陸水雑, 21, 237~243 (1960).
- 8) 森山善蔵・川西博：大分県温泉研究会報, No. 15, 56~63 (1964), No. 16, 64~74 (1965).
- 9) 森山善蔵：同上, No. 17, 23~31 (1966).
- 10) 笠間太郎：地質雑, 59, 161~172 (1953).
- 11) 吉川恭三・志賀史光・岩上寿子：大分県温泉研究会報, No. 15, 6~14 (1964).
- 12) 吉川恭三：陸水雑, 21, 9~16 (1960).
- 13) 瀬野錦蔵・山下幸三郎：大分県温泉研究会報, No. 1, 1~14 (1950).
- 14) 吉川恭三・山下幸三郎：温泉科学, 10, 98~109 (1959).
- 15) 山下幸三郎：大分県温泉研究会報, No. 12, 31~40 (1961).
- 16) 山下幸三郎：*Spec. Contrib. Geoph. Inst. Kyoto Univ.*, No. 5, 17~24 (1965).
- 17) 室住正世：地学雑, 68, 1~17 (1959).
- 18) 山下幸三郎：大分県温泉研究会報, No. 16, 44~47 (1965).
- 19) 山下幸三郎・森忠敬：同上, No. 17, 12~17 (1966).
- 20) 湯原浩三・友定彰：*Spec. Contrib. Geoph. Inst. Kyoto Univ.*, No. 5, 33~44 (1965).