

シンポジウム —温泉成因論—

第1部 温泉の水の起源

座長 (東海大・海洋) 杉山 隆二

発言者 岩崎, 福富, 野口, 村上, 石川

第2部 温泉の化学成分の起源

座長 (東邦大・教養) 野口喜三雄

発言者 岩崎, 佐藤, 甘露寺, 綿抜, 東海林, 杉山(尚), 大島, 斉藤(省), 小坂

第3部 温泉の熱の起源

座長 (防災科学技術センター) 湯原 浩三

発言者 山下, 大橋, 甘露寺, 福富, 岩崎, 野口, 佐藤, 綿抜, 初田

第4部 温泉の寿命または生成の地質時代

座長 (広島大・教養) 豊田 英義

発言者 初田, 石川, 佐藤, 岩崎, 杉山(隆)

温泉成因論に関するシンポジウムは第1日目(8月20日)に行われた。予定時間を約2時間超過して熱心に討論が交わされ、大層有意義なシンポジウムであった。討論の全内容を詳細にお伝えできないのは残念であるが、第2部、第3部、第4部については座長から総括がよせられたので以下に掲載する。

第2部 温泉の化学成分の起源

座長 野口喜三雄

野口 温泉水を形成する水の起源については古くより論議され初生水説、岩漿水説、循環水説など著名であるが、近年は水素及び酸素の同位体濃度などからする論議もさかんになっている。本来水は純粋の液体の水あるいは水蒸気として地下深部から上昇するようなことなく常に他の化学成分を伴っているのが現状である。

従って水に伴うこれらの化学成分の起源は何処に求めるべきか即ち岩漿に求めるべきか、あるいは通路の岩石から由来するとするか、あるいはその他か、など論議を要する問題点が多数含まれている。

まず最初に発言予定者岩崎博士にこの問題に関する見解を伺い、ついでその講演を中心に御意見を述べていただく事にします。

温泉中の物質の起源

東邦大学理学部化学教室 岩崎 岩次

温泉中の物質の起源としては、その温泉中への導入される機構を考えた上で、現在の温泉の多種多様の性質および多種多様の湧出量とそれが長年月の間、日変化、季節変化、年変化を示しながらつづけれ、やがて消滅して行くのであることを考えて、それらの間に矛盾なく説明できるようなものを考えて行かなければならない。そして一般的の温泉生成機構は現実の各箇の温泉湧出機構では、その地方の地学的性質によって著しく変化されていることが多いことも

十分に考慮する必要がある。

温泉中の物質の原料としては (1) 固体からくるもの岩石 (火成岩, 火山岩, 水成岩それらの破片など), 土壌, 火山昇華物, 塩類鉱床, その他の鉱床, 生物質など (2) 液体からくるもの地下水 (深いもの, 浅いもの), 地表水, 海水, 化石水, 火山水など (3) 気体からくるもの, 火山ガス, 化学反応によるガス (変質現象, 變成現象, 交代現象など), 生物によるもの (CH_4 , CO_2 , H_2 など)

これらの原料物質の温泉中への導入される機構としては, (1) 熱を運ぶ機構に伴って導入されるもの (蒸留などをも含む) (2) 水と一緒に運ばれてくるもの (地表水, 地下水, 海水, 化石水, 火山性水などに含まれて) (3) 水によって附近の物質から溶解されてくるもの, (抽出, イオン交換, 脱着など) (4) ガスとして導入されるものなどがある. 逆に一度温泉中に導入されたものが, 沈殿, 吸着, イオン交換, ガス発生, ガス放出などの各現象によって温泉中から除去される物質も多いことを十分に考慮すべきである。

各種の温泉があるので, それらの各温泉について各材料から温泉中の物質の各何%あたりが入ってきているか, またその導入機構のどれが何%を占めているか, 何時, 何処で, どんな経過をして現在の位置に湧き出してきているものであるかが, 現在の科学的知識に矛盾なく説明できるものでなければならない. それでその湧出機構を考えたらある程度の模型実験をしてそのどれかを決定しなければならない. この時, この説でも可能であるだけでは不十分で, 他の説では説明ができないことをも明らかにしなければ信頼度が低い. 温泉は各種の地層を通して湧き出すので, 温泉中の物質の起源をただ一種しか考えないで何々源ときめつけることは極めて危険であり, 各種の起源の物質が混入していることが考えられるのである. その主要な部分がどの起源であるか, その根拠を示しておかなければならないと思う。

質問 1 (佐藤) 火山によって温泉水の化学成分に相違があるか。

答 (岩崎) これはむづかしい問題であって簡単にはわからない。

質問 2 (甘露寺) 温泉水に含まれる塩素は海水起源か。

答 (岩崎) さう云ふものもあると思はれるが, きめ手はないので実際にはむづかしい。

質問 3 (甘露寺) 塩素が岩漿から供給されるとすれば塩酸としてかアルカリの塩化物としてか。

答 (岩崎) 両方あると思ふ。

質問 4 (綿拔) 火山ガスの化学成分が温度によって酸性の強いものから次第に弱い炭酸ガスの方へ移行するのは何に基因するか。

答 (岩崎) それは温度と圧力による岩漿揮発物質の分化作用によるものである。

質問 5 (東海林) 油田地帯の温泉の炭酸ガスの起源は何か。

答 (岩崎) 火山性のものや生物起源のものがあると思はれる. 生物起源のものが特に多いかも知れない. 詳しくは同位体比など測定してみないとわからない。

野口 温泉は通常の湯と比較すると初生水が含まれており入浴などの場合治療効果がすぐれていると一般に考えられている. 温泉の化学成分に関連して医学の立場から御意見は如何ですか。

答 (杉山尚) 温泉の医治療効果発現因子として, 淡水温浴でもみられる温熱, 水圧, 浮力などの作用のほかに, 温泉特有の作用として, 化学成分が考えられることは当然である. こ

れは、たしかに温泉特有の作用であり、含有主成分のほかに微量稀有成分の生物学的作用も無視できないことも知られている。そのほかに温泉湧出直後の不安定な処女水としてのエネルギーが何らかの作用を生体に及ぼすことも考えられる。温泉の触媒作用などもその例であろう。

しかし、医学的立場から温泉の医治効能をみる場合、温泉のもつ、温度、浮力、水圧などの物理的刺戟、化学成分、pH などの化学的刺戟や電氣的刺戟、その他が総合して生体皮膚に刺戟として作用し、これが生体反応を惹起して機能変調を招来するという作用機転があることを見逃すわけには行かない。この際、これらの刺戟はその刺戟の性質が問題ではなく、その強さが問題となり刺戟をうける人体の反応態度が問題となる。この意味で医学的には非特異的変調作用といわれる。ことにわが国の湯治のように高温浴、頻回浴が行われている所では、この作用機転、医治効能が最も重要であることを注意する必要がある。わが国で「湯中りと医治効能」が最も注目されるのは、このためである。

大 島 温泉は一般に種々の化学成分に富んでおり、通常の地下水とは若干違うとせられているが、医学的にも入浴あるいは飲泉の場合明に特殊効果が認められる。

斉藤(省) 温泉水中に含まれる化学成分は人が入浴すると鉄分や炭酸ガスのように人体の皮膚から吸収されるものがある。温泉水中には通常の地下水より種々の化学成分が含まれているからこれらの成分が温度や圧力のような物理的作用のほかに作用することが期待される。

野 口 まだ質問が沢山あることと思いますが、ここで本日発言予定のもう一つの小坂博士の講演をお願いすることに致します。

— 温泉の化学成分の起源 —

東京工業大学 小坂 丈子

温泉含有成分、特に酸性泉中の陽イオンの起源の主要なものの一つは、温泉源水の通過する周囲の岩石中から供給されるものと考えられる。それ故このとらえどころの少ない温泉水中の各成分の割合や、その変遷を規制するもの一つに、岩石の変質溶脱の法則をあげることができる。しかるにこれらの現象のほとんどは、地表下で行われるものであるから、その生成の状況を直接観察することは困難である。また温泉にはかなり古くから続いているものも多く、過去の状況は必ずしもつまびらかではない。そこで我々は先ず地表にもたらされ、或は地表に残された現象を現在の時点で出来るだけ詳しく観察し、地表下や過去の状態を類推する。次にこれにもとづいて再現実験や人工実験を行って、それを実証しなければならない。ところがその実験と天然での観察結果がくいちがうことがしばしばある。それには種々の理由があるはずであるが、その原因となる様なものを2~3あげようとした*。ともかくこのように温泉は、その生い立ち及び一生の変化のどの部分にあたるのかを充分考慮に入れた上で、調和のとれた観察や実験を行なはなければならないと考える。

* うちひとつは後述、他のひとつは変質状況や溶脱割合の圧力による影響につき述べようとしたが、時間の関係で割愛した。

質問1(福富) これまでの人工実験は種々の時間での集積効果が多かったが、温泉水は流動しているもので、短時間の接融期間によって作られるのであり、その上特に接融をうけた母岩の成分も変化するのであれば、これに注意する必要がある。

答(小坂) 現在はその点を考慮した実験が次第に行われるようになり、岩石試料中に溶液を流動させ一定時間毎に取って調査する方法や、累積曲線でもそれから各元素の変化率や変化勾配を求める方法などがとられている。

質問2(綿抜) 岩石変朽部分と未変朽の部分の境界がはっきりしているのはなぜか。

答(小坂) その理由と思われるものの一つは、天然の作用による岩石変朽の観察では、変朽端からの距離が離れるとその効果が衰えると答えられていたが、それだけではなく、pH値なども変化する。このため酸性の変朽の場合、接触面から離れpH値がある値に達すると岩石に対する作用が急激に弱まり、変朽が進まなくなる点があり、これがかなり明瞭な境界として残るのではないかと考えている。ついでにさきほど述べようと思った天然の観察と人工実験の結果の差異のうちの一つはこれに関係したもので、天然では主として過去の変朽の結果について今述べたように、位置関係で変化の差異を求めているものが多いのに対し、人工実験の場合は時間的経過のみを追っている場合が多いため相互の相違を生じたものと思われる。

質問3(綿抜) 大涌谷での岩石の腐蝕実験にて腐蝕がよく進むのは蒸気より水の影響の方が大きいのではないか。

答(小坂) この場合蒸気のほかに水の影響も充分考えられる。

岩崎 温泉水中に含まれる金属成分など岩石から来るものもあるであろうが、さうでもないものもあり、吾々も種々実験しているが、わからぬ部分が多く今後の研究にまたねばならない。

野口 温泉水中に含まれる種々の化学成分がそれぞれ何から由来するかは極めて重要な問題であって質疑応答に十分な時間のないことは誠に残念であるが、今日の智識の段階では不明な点が極めて多い。今後の皆様方の研究によって一歩ずつ解明されることを祈っております。御講演下さった岩崎、小坂両博士に厚く感謝すると共に熱心に御討議並に御清聴下さった皆様方に感謝して終わることにします。

第3部 温泉の熱の起源

座長 湯原 浩三

温泉の湧出にともなって放出される熱エネルギーが、どのような熱源から、どのような過程で温泉に与えられたものであるかを解明することは、温泉現象の本質に迫るもっとも重要な問題の一つである。この温泉の熱源に関する問題は、温泉水の起源に関する問題と共に、古くから多くの人々によって研究され、多くの説が提出されている。これらの諸説は大別すると、

(I) 火山性熱源説

(II) 非火山性熱源説

に分けられる。(I)は温泉の熱源は火山現象にあるとする説であって、温泉が火山現象の余効あるいは火山の周辺現象であるとする見方もその中に含まれる。

これらの見方からは、温泉が後火山作用の一つであるという概念が生じる。古典的な地質

学、火山学ではこのような立場をとっているものが多い、しかし、このような見掛けの火山との関連によってのみ説明するには、温泉現象はあまりにも複雑で奥深いものであることは、現在の温泉研究者にとってはもはや常識であろう。しかし後にふれるように、火山と全く関係のない熱源が温泉熱の起源の中に占める割合はそんなに多くないと思われるから、広い意味の火山現象、すなわち火山をつくり出すマグマの活動に起因する熱が、温泉の熱の起源の大部分を占めていることも疑いない。福富 (1970) によれば、本邦における温泉地総数のおよそ 86% は第四紀火成岩を熱源とする温泉であり、およそ 3% が新第三紀特に鮮新世末期の火成岩を熱源とする温泉であることを指摘している。

上部マントルに発生した本源マグマが上方に移動して、地下 5~10km の深さにマグマ溜りを形成し、それが火山現象の根源になるといわれている。実際にマグマ溜りの形成がそのようなものであるならば、マグマ溜りが形成される場所が 10km 以深であることもあり得るであろうし、上昇途中で消滅してしまうマグマ溜りもあるのであろう。このように火山現象をひきおこすまでにいたらないマグマ溜りもあって、それが温泉の熱源となる可能性はあるであろう。

上部マントルで本源マグマが発生し、それが上方に移動してゆく地域は、地球上では造山運動や地震活動の盛んな地帯と一致するはずである。火山帯が造山帯や地震帯と一致しているのは当然である。そして、造山帯には、たとえ地表にはっきりした火山現象が認められなくても前述のような潜在するマグマ溜りから熱を供給された温泉があってもよいわけである。実際湯原が世界 (1970) の温泉分布をしらべたところ、温泉の多い地帯—温泉帯と称す—は火山帯と一致しているところが多い反面、火山活動が知られていないところにもかなりの数の温泉があり、それらの地域の大部分は、火山はなくても大規模な褶曲帯や断層地帯に対応していることがわかった。すなわち、温泉の分布は、地表にみられる火山活動の分布のみならず、それをも支配するより本質的な地体構造、あるいはそれに伴う地球の熱的なパターンを反映しているといえる。したがって、温泉熱の起源として火山性熱源を考えるとときには、地表に見られる火山現象との関連だけを追及してもあまり意味がないであろう。

温泉の熱源として、マグマと全く関係のない真の非火山性熱源として、従来からいわれているものには、

- (1) 正常の地温をもった地殻
- (2) 断層運動による摩擦熱
- (3) 化学反応熱
- (4) 放射能による熱

がある。

(1) については、正常地温によって温められた水が、冷却すること少くして、地上へ湧出するような構造があれば可能である。福富 (1970) は、日本の温泉のおよそ 10% はこのような熱源によるものであろうことを指摘している。このような温泉の限度として、福富は泉温 50~90°C で 1000 l/min 程度、湯原 (1969) は泉温 60°C で 2000 l/min 程度を与えている。実際には、濃美平野の長島温泉は泉温約 50°C、湧出量計約 5000 l/min 程度である (佐藤による)。

(2) の断層運動による摩擦熱については寺田 (1930) の研究がある。これによれば 100 m はなれた 2 つの面が相対速度 10m/min で動いたとき、内部摩擦係数を 10^{12} とすると、16°C 程度の温度上昇となる。この問題については、その後詳しく研究されたことは聞かないが、摩擦熱が温泉の熱源の一部になっている可能性は十分考えられることであって、地震の際の泉温上昇

はこれによって説明できるかもしれない。

(3) の化学反応熱については、Day と Allen (1924) が Lassen Peak National Park の温泉について検討したものが有名である。彼等は、

硫酸の形成のときにできる熱	1.0 kcal/g
硫酸で岩石が分解するときの熱	0.6 kcal/g
計	1.6 kcal/g

と推算した。議論の対象となった温泉の温度は 91°C であって、地下水の温度を 10°C とすると、化学反応熱は $1.6/81=0.02$ にすぎないことがわかる。結局は温泉の熱源として化学反応熱はあまり重要でないという結論であった。また綿抜 (1970) によれば、硫化水素から硫黄が生成するときの熱は 1g 当り 0.365 kcal で 1000 t の硫黄が出来るときの熱は $3.65 \times 10^{10}\text{ cal}$ に達する。しかしこの量も、例えば玉川温泉からの総放熱量 10^{22} erg/year と比べると、その量の 1 万分の 1 にしかならず、やはり、温泉の熱の起源としては、化学反応熱はほとんど問題にならないようである。

地球全体としてみた熱エネルギーの源としては、放射性元素による発熱が重要である。すなわち、大陸の地殻から出てくる放射能は実際の地殻熱流量の約 70% を説明し、他の原因による熱、たとえば、地球構成物質中にもともとあった熱、地球の凝縮熱、化学反応熱、内部運動による摩擦熱などは全部で残りの 30% をすぎないといわれている。

もし、ある地域に放射性物質が異常に集中しておれば、温泉地や地熱地域のような放熱量が異常に大きい地域ができる可能性はある。しかし、実際の温泉の放射能と泉温のあいだには正の相関は少なく、多くの強放射能泉の泉温は低い。また、噴気孔、沸とう泉、間欠泉には放射性物質は少ない。したがって、現在のところ、放射能による熱が直接温泉の熱源になることはほとんどないと考えられている。

温泉のもつ熱エネルギーは、地熱発電技術の進歩にしたがって、その利用が注目をあびて来ている。また、世界的にみた温泉の分布が、火山の分布以上に、地球全体の熱的パターンを反映するものである可能性も大きいので地球熱学的にも、温泉の熱源の研究はますます重要性をまして来たといえるであろう。今後、この方面の研究が急速に進展することが望まれる。

本稿はシンポジウムにおける次の諸氏の発言を座長の責任においてとりまとめたものである。発言者(発言順)、山下、大橋、甘露寺、福富、岩崎、野口、佐藤、綿抜、初田。

文 献

- Day, A. L., Allen, E. T.: Jour. Geol., Vol. 32, No. 3 (1924).
 福富孝治: 北大地球物理研究報告第 23 号, 15-28 (1970).
 Terada, T.: Bull. Earth. Res. Inst., 8 (1930).
 湯原浩三: 温泉学, 地人書館, 261 (1969).
 湯原浩三: 地学雑誌, Vol. 79, No.2, 57-79 (1970).
 綿抜邦彦: 私信による (1970).

第 4 部 温泉の寿命または生成の地質時代

座長 豊田 英義

豊田 「さて、私の番になりましたが、時間もとうに過ぎてやがて 6 時になります。また私

の担当の問題もどうやら前の部で出つくしていると思うのですが、なるべく重複しないように読みたいと思います。

私の担当は「温泉の寿命、更に生成の地質時代」ということですが、「温泉水の起原」「熱の起原」などの時に論じつくされているようです。然し一応、私の考えを述べて皆様の御意見を承りたいと思います。

温泉の生成時代を論じる前に、甚だ幼稚な発言ですが、地下やや深いところに太陽の輻射熱と地熱(すなわち地温)の釣合うところがあり、それが所によつてちがうけれども大体 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$ ぐらいです。自然に湧きでる水の温度が 25°C 以上もあるということはそこに何かの原因、つまり異常地温あるいは熱源があると見なければならぬ、それは何が原因か、というのが私の担当の区分なんです。

初田さん、先程のお話をこのテーマについてお話願えませんか。

初田 先程のことで言いつくしたように思われますので、湯原さんに。

豊田 湯原さんどうぞ。

湯原 初田さんはうまく逃げてしまわれましたが、やはり熱源としては火山性ばかりでなく、花崗岩など深成岩から来る放射能によるものがありはしないかと思うのです。

初田 それもありかもしれませんが、特に証拠を挙げろとなると。

石川 火山活動の名残りとして熱源は充分に考えられ、皆もそう信じているわけですが、やはりそこまで達するだけの地下水と、またそれが更に上昇して来るメカニズムがないと「温泉」にはならない。私は北海道の温泉の個々についてはいろいろ調べてみましたけれどどうも個性といいますか、場所によつてそれぞれちがうようです。その点、アチラコチラを調査されている佐藤さん、如何ですか。

豊田 佐藤さんいかがでしょうか。

佐藤(幸) この問題は前に語りつくされているようですが、やはり火山活動の余波といつてもこれが裂コとか断層とかに沿つて熱源そのものが地域的に地表近くまで来ていることが先決でしょうね。

岩崎 つけ加えて申しますと、豊田さんのおつしやつた温泉の成生時代という問題ですね。これは中々むづかしい問題として残るのではないのでしょうか。

豊田 大体において、何年ぐらい熱源が持続するかということで福富先生が計算されたのがあり、私も少々心許ない発言になると思うのですが、前に道後温泉を調べました時に「温泉の化石」といいますか、白い沈澱物がある一定方向にならんでいる割目を観察しましたので一種のヒントを得たわけです。また現在の地学的知識から申しまして、火成活動の時期は大体分つて居りますので、あるいは非常に古い火成活動の名残りも泉質その他から推定できる可能性もあるのではないかと思つているわけです。最後に杉山さんに何かひとこと。

杉山 豊田さんの言はれることは御もつともだが、そう古い火成活動の名残りがあるとは思えない、何万年単位ではないでしょうか。中生代の終りは7千万年といはれているが、そんなにジワジワと熱が残つているとは思えませんね。むしろ前にありましたラジウムの熱だとか、平凡な地下増温率的に高い地下深いところで特殊のメカニズムで接しよくした地下水の上昇があつてもよいと思います。

