

温泉の熱源について

駒沢大学教授 宮部直巳

(昭和44年7月30日受理)

Heat Sources for Hot Springs

Naomi MIYABE

Professor, Komazawa University

温泉とは、いうまでもなく、地中から高温の水が湧出してくる現象である。そこで、温泉に関する多くの興味ある問題の中からその温泉に温度を与える源、即ち、熱源の問題をとりあげて、地球物理学の立場から考えてみたい。

温泉のもう一つの要素である所の水については、二つの源が考えられている。一つは、循環水であり、一つは処女水である。処女水は、地球内部を構成している物質の中に含まれていた水分が徐々に地表面に出てきたもので、はじめて大気に触れるようになる水であるといつてよく、従って、元来高温であるから、温泉の熱源の一つに数えてもよいものである。循環水は、地表面を流れている水が、いろいろな事情で地下に浸透し、いわゆる熱源に接して温度を高め、再び湧出、又は噴出するものである。温泉の水は多くの場合この循環水であると考えられている。この水を温めるための熱源について、茲で考えてみようというわけである。

地球内部は、高温高圧の状態にあると考えてよい理由がある。平均的には、深さ100mを増すごとに、凡そ3°C温度が上昇する。それ故、凡そ3kmの深さのところでは、100°C位地表面より温度が高いことになる。従って、地表面にある水を3km位の深さまで循環させるようにすることができれば、常に高温の水、即ち温泉を得ることができる筈である。併し、自然状態のもとで、そのような深さまで水を循環させることは甚だ困難のようである。何故ならば、もし、そういうことが自然のままですぐに可能であるなら、至る所に温泉があつてもよいわけであり、地下からの湧水は大部分が温泉であり得るからでもある。東京付近に若干の深井戸があり、その深さは、凡そ600~700mであるが、そこから汲上げられる水の水温は凡そ30°C位で、少し加熱してやれば充分温泉として使える。又30°C位であれば、いわゆる温泉の定義には合格するので、そういう意味での温泉がいくつか存在している。

併し、普通に温泉といわれている現象については、いくつかの特徴がある。

まず、温度は少なくとも、40°C内外から100°C近い高温のものまであつて、その中には空中高く噴出するものもある。火山地帯にあるものが多い。或は、断層に沿つて湧出又は噴出しているものもある。

又、注意すべきことの一つとして、雨が降つた時など湧出量が増加するが、そのような場合に温度も亦高くなる。

地下からは、常に一定量の熱水が湧出していて、それに通常の冷たい地下水が混入して適当な温度の温泉が湧いてくるものと考え、降雨で湧出量が増加したような場合には、常識的

には熱水はより薄められるであろうから、温度は低下するのではないかと期待されるのであるが、その逆の場合の方がむしろ一般的だとみられている。勿論、そのような場合に温度が低下することもあるようである。

これらのことから考えて、温泉の熱源としては、地表面に比較的近いところにある特有の熱源を考えることが必要になってくる。例えば、降雨による湧出量の増に伴って、温度も上昇するということは、熱源の近くを通過して温められる水量が多くなれば、それだけ、温度の高くなった水の量も多くなり、それが、水路を通過して湧出するに至るまでの道程において、冷却する場合にも、温められた水の量が多ければ、失われる熱の割合も少なくなる勘定であり、湧出温度は若干高くなることが期待される。このことは、温泉の熱源が、地表面からあまり深くないところにあるということが条件になる。

火山の噴火に伴って溶岩が流出することがあるが、そのような溶岩は地表面から数 km 乃至 10 km 程度の範囲の地殻内に溜っているものと考えられている。地球表面には、固化した殻があり、特に、陸塊といわれる部分ではその厚さが 30 km 内外といわれている。

溶融状態にある高温高圧下の岩漿はその下部にあるのであるけれども、これも、必ずしも流動性をもっているかどうか疑わしい。何故ならば、そこには、2種類の地震波が伝わり得るからである。併し、何かの特別な条件にめぐまれば、——例えば、上部の地殻に亀裂でも生じて、一部に圧力低下が起こると、か特殊の化学変化が起こるとか——急に流動性を帯びて、溶融した岩石が上方地殻内に浸入し、ある場所に止まって、そこに溜りを作ることもできよう。それは火山の源でもあり、温泉の熱源ともなり得るわけである。このような岩石溜りの熱源は、下部の岩漿とたえず連絡をもっていることもあろうし、孤立した溜りとなることもあろう。いずれにしても、こうした地殻内に浸入した高温の岩漿の塊は、熱源となって、周辺より低温の部分に熱を与え、自らは冷却してゆくことになる。冷える時に、いわゆる循環水が熱を運び去るというような作用が大きければ比較的はやく冷却するであろうが、数 km 乃至 10 km の深さまで循環水が浸透することは稀と思わなくてはならないので、むしろ普通の熱伝導によって、熱が外へ逃げてゆくことによって冷えるものと考えの方が妥当であろうと思われる。

そうした時に、このような——即ち、地殻の中に上昇してきた岩漿の溜りのような——熱源はどのくらいの寿命をもつものであろうか、ということを考えてみる必要があると思われる。勿論、それは、岩漿溜りの大きさ、温度、その深さ、周囲の岩石の性質、即ち、熱を伝える性質によるわけである。併し、この問題は、非常に正確な答を求めることは非常にむずかしい、のみならず、さほど必要なことではないと思われる。

そこで、最も単純な場合をとり、地下ある深さのところに、突如として半径 1 km の高熱球体が出現したとする。そして、この高熱球体の温度が時とともにどのように変わってゆくかを調べることは簡単な数学を利用すれば容易にできる。

この球体の温度は最初に 1000°C であって、その周辺の岩石の温度は 0°C であったとする。

又、岩石の熱伝導に関する常数は 0,0118 とするが、これは花崗岩の常数の平均値である。そうすると、球体内の温度分布は図-1 に示したようなものとなり、周辺が 100°C 近くにまで冷えるには凡そ 1 万年を要することになる。火山の場合には、この岩漿溜りに相当する球体の半径は凡そ 3 km 位と想像されているが、そうすると、この状態まで冷えるには凡そ 10 万年かかることになり、火山の平均年齢として採用されている値と大差ないということである。

このように、地殻に浸入した岩漿溜りは、熱源としてかなり長い寿命をもっているということが言える。又、図-1から判るように、外側へゆくほど温度が低くなっているが、このよう

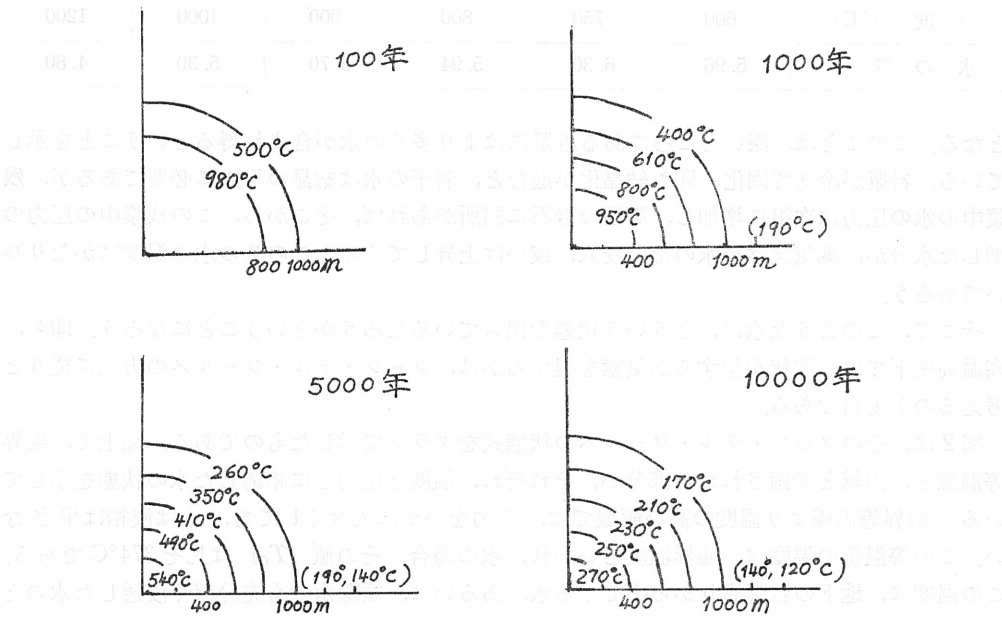


図 1 岩漿溜りの温度が熱伝導で冷えてゆくようすを示す計算の例
(早川氏等“地熱発電”による)

な状態だと、熱が伝導によって球体から外に流出する量は、 1×10^{-5} 乃至 5×10^{-4} cal/cm²secとなる。地表面のいろいろな場所での熱の流出量が測定されているが、それによると、一般的な熱流量の値は 1×10^{-6} cal/cm²secであるから、この場合は、その10倍乃至500倍ということになり、火山や温泉地帯における実測熱流量により近い値となっている。

実際には、岩漿内でもいろいろと複雑な現象があって、上述のような簡単な模型では、実体を説明しきれないものではないけれども、茲では、温泉の熱源を考えるのであるから、岩漿については、この程度として、これを2次的な熱源として更に3次的な熱源について考えなくてはならない。何故ならば、前述のように、循環水が温泉水の主要部分であるとする、循環が直接岩漿からの熱によって温められるということは、岩漿溜りの存在すると考えられる深さ——即ち数 km 乃至 10 km という深さ——から推してむしろ勘ないのではないかと考えられるからである。

一方において、岩漿溜りができたときに、その中に含まれる揮発性成分の代表としての水についてみると、実験的に、次のような結果が得られている。一つは、900°C という温度において、種々の圧力の下で岩漿中に含み得る水の割合は (ゴランソン氏による)。

圧 力 (バール)	490	980	1940	1960	2940	3000
水 の %	3.73	5.70	8.21	8.14	8.98	8.92

となっており、又、980 バールの圧力下では

温度 (°C)	600	750	800	900	1000	1200
水の %	5.96	6.30	5.94	5.70	5.30	4.80

となる。このことは、深いところにある岩漿にはより多くの水が含まれ得ることを示している。岩漿が冷えて固化、即ち結晶化が進むと、若干の水は結晶の形成に必要であるが、残漿中の水の圧力は次第に増加し、周辺の岩石に弱所があれば、そこから、この残漿中の圧力の増した水分が、熱気又は熱水の形で浸入、或いは上昇してくる。この時の水の温度はかなり高いであろう。

そこで、このような水は、どういう状態を保っているだろうかということになる。即ち、高温高圧下では、液状を呈するか気態を呈するかは、フェン・デル・ワールスの方式に従うと考えるのが妥当である。

図2は、そのフェン・デル・ワールスの状態式をグラフで示したものである。図上で、臨界等温線と、点線とで画された各部分が、それぞれ、温度と圧力とに相応した水の状態を示している。臨界等温線より温度の高い領域では、圧力をいかに大きくしても、水は液相は呈さない。この等温線の温度は、臨界温度といわれ、水の場合、その値 (T_c) は凡そ 374°C である。この温度は、地下の岩漿溜りから出てくる水、あるいは、循環水でも充分深く浸透した水のとり得ない温度ではないわけで、それだけに、熱源に触れて高温となって地表に出てくる水の行動は、決して単純ではないということができよう。更に、地下の水蒸気或いは熱水の行動を制

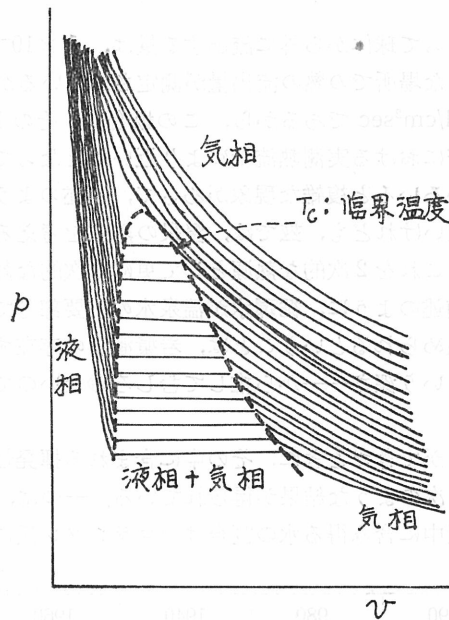


図2. 圧力と容積 (比容) との関係を示す等温線群 (Isotherm)

— Van der Waals の式 —

御するものとして、地殻或いは地層の構造が挙げられる。

上述のように、温泉の熱源として、1次的には、一般的な岩漿を考慮してもよいが、温泉群が局部的に集中して存在することから考えて、岩漿溜りというような2次的な熱源を考慮すべきであるが、このような2次的な熱源も直接的な熱源ではなく、直接的な熱源への熱の供給源と考える方がより妥当であるように思われる。直接的な熱源としては、地表面から浸透する循環水に熱を与え、又岩漿溜りから直接浸出してきた水をこれに加えることができるような熱源を考える必要があるようである。いわば、熱水の貯溜槽(層)を考えるのが便利である。幸にして、地層は一様な物質でできている層ではなくて、岩石(いわゆる土を含めて)の大小の粒子の集合体である場合が多く、従って、その粒子間の緊結の度合に応じた孔隙を有している。地層の容積の数パーセント乃至数10パーセントは元来空隙であって、そこに熱水を貯溜し得る余地を持っている。

このような貯溜された熱水(蒸気を含めて)は、その圧力にしたがって孔隙中を行動するが、その行動は、動く速さが十分に遅い限り、圧力の大きい方から小さい方へ、層中の水の通り易さに比例して動く。勿論、水として動く場合と、蒸気として動く場合とで、その動き方は相違するから、同時に、孔隙のある層をつくっている物質の総合的な熱伝導率にも関係をもつことになる。何故ならば、その熱伝導率の大小は、熱水冷却の度合に関連するからである。

これらの事情を一つの模型に表現すると、図3のような模型を考慮してもよいかもしれない。

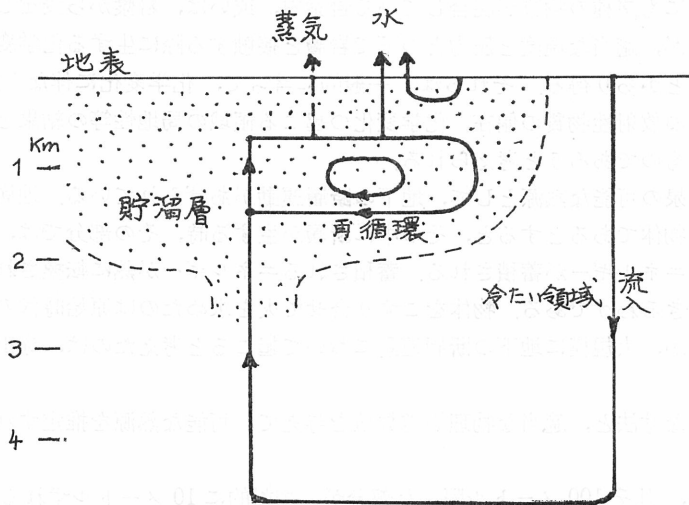


図3. 貯溜層の模型(ワイラケイの場合)

(早川氏等“地熱発電”による)

この模型は、実は、ニュージーランドのワイラケイにおける地熱利用計画に際して提案された。その地域の熱水系のパイプモデルであって、これに伴う数値が与えられている。これを一般的な温泉の模型とするのは早計かもしれないが、併し、いずれにしても、多少の修正を行えば、略々どの場合にもあてはまりそうである。

ここで考えられることは、若し、上述のような熱水の貯溜層が、不透水層或いは難透水層即ち、緊密な地層に蔽われているとすると、その貯溜層内の熱水の温度も圧力も高くなるであらう。

うということである。実際には、といっても、ある適当な仮定のもとで計算した結果であるが、温度、圧力の極値は大して変らないが、高压部が拡がり、高温部が幾分上昇する。適切な量の熱水を採取するならばこの状態は相当に長期に亘って保持されるであろう。そうすれば、この熱水のエネルギーを取出して他に転化させることができる筈である。地熱発電という構想がこうして生れてくることになる。

温泉のエネルギーを医療に、又保養のために使用するという利用方法は今日までに行なわれてきたことであるが、これを生産手段にまで利用するようになってきたわけである。尤も、温室栽培などに従来も利用されてはいたけれども、温泉の熱源にまで手をのばしてそのエネルギーを大量に利用するようになるのは、今後のことになるであろう。

従って、温泉の熱源に関する基本的調査研究も、今後になんらかの領域が残されていると言えよう。

最後に、上述の2次的熱源について、少し蛇足を加えておきたい。

今迄に述べた所では、2次的熱源として岩漿溜りというよなものを考えている。我国のように火山の多い国土では、多くの温泉は火山に伴っており、火山の源と同様な熱源を考えるのは当然のことであろうと思われる。併し、局部的な熱の発生源は、外にもある。例えば、ラジウムは自然崩壊によりラドン、ラジウムA等を生ずるが、1グラムのラジウムと、その変壊生成物質とが平衡を保っているとき、1時間に発生する熱量は凡そ140カロリーであると言われている。その他にも諸種の物質が混合している岩漿内、或いは、岩漿から浸出して周辺の岩層に浸入した液体が、適当な温度と圧力との下で岩層と接触する際に生ずる化学変化において、熱を放出することがあり得る。それらは、一般的に言って、化学変化に伴う発熱現象であり、ラジウム等の放射性物質の偏在、化学変化の起こる領域の局地性等の結果として、2次的熱源となり得るものであらうと考えられる。

もう一つの温泉の可能な熱源として、地下の断層運動があげられている。地層を非常に大きい粘性をもった物体であるとする、その中に断層が生ずる時、その部分では、ある範囲に亘って、ひずみのエネルギーが蓄積される。蓄積されるエネルギーが熱に転換されるとすれば、そこに熱源ができるわけである。物体をこすり合せて火を求めたのは原始時代の人間の知識であったが、それが、大規模に地下の断層運動において起こると考えたのは、寺田寅彦先生の発想である。

あとは、適当な寸法と、適当な物理的常数値を与えて、可能な熱源を推定すればよいことになる。

地下において、凡そ100メートル隔った部分が、相対的に10メートルずれるとする。その間の部分の粘性係数は一般に岩石の粘性係数として知られている値、 $\eta=10^{18}$ 、に等しいとすると、その断層運動が1分間に行なわれる場合に、ある量の熱が発生するわけであるが、その熱の単位質量に対する値を岩石の比熱、0.25、で割ると、温度の上昇は $\theta=16^\circ$ に達し、温泉の熱源としては充分可能な値となる。又、このように上昇した温度は、中央部分で最高で、周辺にいたるほど低くなっており、その温度分布の状態を適当に仮定したとき、中央部分の温度が最初の $1/\sqrt{2}$ になる(ほぼ2/3になる)までの時間を計算してみると凡そ79年になる。又、温度の上昇した範囲を10倍にとれば、熱源の最高温度が上述のような意味で $1/\sqrt{2}$ になるまでの時間は7900年となり、いずれにしても、かなり長い年月の間熱源として保存される勘定になる。併し、これは、熱が伝導によって逃げる場合であって、温泉で運び出されるというこ

とになると少し話がちがってくる。

そこで、毎秒 10 リットル (毎日 864 立米) の 80°C に温められた水が温泉として出てくるものとする、この温泉によって運び出される熱の量は凡そ 8×10^5 カロリー毎秒ということになり、100 年間に 2.52×10^{15} カロリーという量になる。この量は、前述のように比熱が 0.25 という岩石の、一辺凡そ 120~130 メートルの立方体が、平均して周辺よりも 80°C だけ温度が高くなっているときにもつ熱量に相当する。

勿論、これらは単にある仮定にもとづいた計算であって実際にそういうものが存在するというわけではない。併し、又、その計算の結果でてきた数字は、ありそうな値を示しているの、或いは、このような熱源が存在するかもしれない。

温泉は自然が人類に与えている重要な資源の一つであると考えられる。そしてその利用の道はいろいろの方面に拓かれている。その重要な資源であるということの一つの理由がそれが熱エネルギーを与えるといえるということにあらうと思われるが、その熱エネルギーの源、即ち、何が、どういうふうにして温泉に熱エネルギーを賦与しているのかということになると、存外明らかでない面があるように思われる。そう思われるというのは、単に筆者の一存であるに過ぎないかもしれない。それにしても、温泉という天与の資源を更に我々の幸福のために利用しようという場合には、このような、熱源の問題を含めて、基礎的な諸問題が更に深く追求されてゆくことがまことに望ましく、また、そのような研究が現に進められていることを信ずることのできることをよろこばしく感じるものである。

(1969—7—22)

引用文献

- | | | |
|-------|---|---|
| 早川 正巳 | } | 1967. 地熱発電. 東京 ラテイス |
| 馬場 健三 | | |
| 皆川 理 | } | 共訳. 1943, マダム・ピエル・キュリー著放射能 下巻 東京 白水社 |
| 杉本 朝雄 | | |
| 三宅 静雄 | } | 1930, "On the Heat Generated by the Deformation on the Earth Crust"
Scientific Papers Vol. VI pp. 377—382. |
| 寺田 寅彦 | | |