

温泉 地熱地域の地下探査

通産省地質調査所 中 村 久 由

Exploration for Geothermal Resources

Hisayoshi NAKAMURA

(Geological Survey of Japan, the Ministry of International Trade and Industry)

わが国は世界でも有数の火山国であり、実に10,000以上の温泉の湧出口をもつ。この中には、いわゆる温泉だけでなく、噴気孔も含まれているので、厳密には、温泉地域、噴気地域と区別して取扱った方が温泉活動を識別する意味で便利であるように思われるが、同一地域内に温泉が湧出したり噴気孔が存在する場所も少なくないので必ずしも両地域を区別することが容易でない。

しかし最近、火山地域の地下から蒸気を取り出して発電に利用しようとする試みが多くの中で行なわれており、すでにイタリアのトスカーナ地方で30数万kW、ニュージーランドのワイラケイでは15万kWの発電がなされ、日本でも岩手県松川で2万kW、大分県大岳で1万kWの地熱発電所が建設されている。

このような地熱開発が、今後さらに多くの地域で行なわれようとしているので、最近では、温泉地域に対して地熱地域という言葉も生れるに至った。その定義はまだはっきり区別されていないが、説明の都合上、ここでは、いわゆる熱水のまま地下から取出し、主として浴用のために使用する目的で開発される地域を温泉地域、その目的は熱水そのものではなく、地下または地上で分離された水蒸気を利用の対象として開発される地域を地熱地域と呼ぶことにする。

もちろん温泉地域と地熱地域は、成因的に兄弟姉妹のような関係にありまったく別個のものではない。しかし、利用の目的からでもわかるように地熱地域においてはできるだけ多量の蒸気が取得できるような場所であることが望ましいので開発に先立って行なわれるいわゆる探査の方法も、地熱地域においては広域的な地質構造を明らかにする内容のものが含まれるのに対して、温泉地域の場合は、比較的狭い範囲の探査に限られることが多い。

温泉ないし地熱地域において、温泉あるいは、蒸気を取出すことを目的として行なわれる探査の他に、泉源の保存のため地下における温泉の存在状態、温泉、地下水の水理を究めようとすることも広い意味で地下の探査に含まれる。

しかし、現段階では、地下に潜在する温泉源を直接地表から察知し、深度、水温、水量まで指示しうるほどの調査技術が確立されていない。いうなれば、間接的に地下の地質構造を推理し、温泉ないし蒸気が存在しうるような条件をその中から見い出して、間接的に温泉ないし蒸気存在の可能性を知るのが現段階の探査の方法である。従って、調査の内容も、直接、間接地下の地質構造を把握するために採用されるものが大部分を占める。これに加えて、温泉を特徴づける熱、化学成分を有力な手掛りとして上述の地質調査と組合せ温泉存在の可能性を判断することが温泉探査の基本方針ということができよう。

以下、現在行なわれている地熱ないし温泉探査の種類を紹介するが、説明の便宜上、地表調

査, 試錐孔を利用する調査に分けて述べることにする。

I 地表調査

I 1-1. 地質調査

地表調査は, 温泉, 地熱徴候の分布を知ることからはじまる。厚い緻密な堆積物で被われている地域でない限り, 温泉の存在地域には多かれ少なかれ温泉徴候が存在するのが普通である。

しかし日本のように地質構造の複雑な国では, 温泉の湧出状況, 温泉徴候の分布, さらに温泉の存在状態等が地域的に異なり, 一口に共通的な特徴を述べることは困難である。

いずれ地下における温泉, 地熱の存在状態については, 直接地表から察知することが難かしいため, いきおいその地域内で掘削された温泉井の資料から温泉と地質構造とのつながりを求めざるを得ない。温泉井の数が多く, かつ得られた資料がその目的を満すに十分である場合には地下における温泉の在り方が自ずと明らかになる筈であるが, わが国においては大温泉地が数多くあるにも拘らず資料不足のため地下の構造のモデルを作ることができるような場所はきわめて少ない。

また, これまでの温泉調査とはかく地点的なものになり勝ちであるため, 温泉の分布を支配する地域的(あるいは地方的)な構造帯の性格があまり明らかにされていない。このような問題は, 直接温泉の探査と関係のない事柄のようにみえるが, いずれ温泉は, 熱源, その起源となる水, 水の下降および上昇の通路となりうるキレツ, 温泉水の貯りうる帯水層(空隙率の大きな地層あるいは透水性のキレツをもつ岩石)等の組合せによって温泉水が作られ, 地下に存在するのであるから, 地域的あるいは地方的な地質構造の傾向がわかれば, その構造帯に含まれる地点の探査に得るところが少なくない筈である。

温泉あるいは地熱がどのような地質構造のところにと貯溜されているかを示す例として, しばしばイタリー, トスカーナ地方のラルデロ地熱地帯およびニュージーランド, ワイラケイの地熱地帯が引用されている。前者は, 地溝帯に堆積した第三紀層(主に泥岩)が帽岩となり基盤の中生層の中に発達するキレツに熱水あるいは蒸気が貯溜されるという特徴をもつ。後者もまたタウポ火山帯といわれる地溝帯の中に堆積した, 凝灰角礫岩をもち, この凝灰角礫岩が水を含みやすい地層であるため, この中に大量の温泉水が貯溜されるといわれている。

このようなモデルは, 広範囲の地質調査と数多くのボーリングによって作られたものであり, どこでも簡単に作成できるという事柄ではないが, ただ探査する場合の心掛けとして, たとえそれが地点的なものであっても, その場所の温泉がどのような地質条件に支配されているかを念頭に入れ, あるイメージを画きつつ調査を行なうことが必要であろう。そのイメージがはたして真実に近いものであるかをチェックするためには後述の物理探査あるいは構造試錐の必要性もまた生ずるのである。

I 1-2 空中写真による構造解析

空中写真を用いて地質調査を行なうことは決して温泉の探査に限ったことだけではない。しかし, 前項でも説明したように, 地域的な構造帯の性格を知る手段として, また, 実際の野外地質調査では掴み難い地形上の特徴を知る方法として空中写真を利用し, それから得られた結果を温泉の分布, 湧出状況などの実際とてらし合わせてみると, 温泉と地質構造との関係を知る上に新たな情報が得られることが少なくない。イタリー, ニュージーランドでは地熱の探査に空中写真を大いに利用しているが, わが国でも 2, 3 の地域で空中写真により構造解析を試

み興味ある結果が得られ、今後、さらに多くの地域で利用されることになろう。

次に、これは直接空中写真からの判読ではないが、最近赤外線映像によって視野内の熱エネルギーの強弱を知ろうとする方法が開発され、地熱、温泉の探査に利用されようとしている。これはすでにハワイのキラウエア火山の熔岩について、熱の発散をキャッチするのに試みられたが、地質調査所の空中写真地質研究室でも那須殺生石でこれを試み、地表から発散する熱の分布状況を画くことに成功した。

従来、地表浅部の温度分布を知るには、孔をあけ、孔内の温度を実測する以外に方法はなかったのであるが、赤外線写真を利用すると、広範囲に亘って地表部における異常温度部分が短時間内に知ることができる。恐らく写真技術の進歩とあいまって、将来この方法は温泉、地熱の探査に欠かせない手段の1つとなるであろう。

I 1-3 温泉作用による岩石の変質

わが国の地熱、温泉地域の大部分は第四紀の火山帯に沿って分布する。特に噴気孔や高温の温泉が湧出する場所では温泉作用によって岩石が変質し一見荒涼たる風景を呈するところがしばしばみられる。

温泉作用によって変質した岩石は、変質をもたらした熱水の pH、化学成分、温度によって種々の変性鉱物を含む。従って、変質岩石の分布、変質鉱物の種類等を知ることによりその地域の温泉活動の経緯を推定するのに役立つ。また、変質帯の分布は、その地域の構造的弱帯を暗示することが多い。いずれにしても温泉作用による岩石の変質についての研究は、地熱、温泉の探査、その成因を考察する上にきわめて重要な項目の1つに数えられる。

I 2 物理探査

地質調査では掴み難い地下深部の地質構造を重力、電気、磁気等の物理的性質を手掛りにして直接、間接地下の構造を判読しようとするのが物理探査である。

前にも書いたように、地熱開発の場合は、地域的な地質構造の把握に重点がおかれるので調査の規模も大きい。温泉探査の場合には、地点的な調査に範囲がしばられる例が多いので、重力、地震等の多額の経費を要する物理探査はあまり行なわれない。

I 2-1 重力探査

地下に密度の大きな物質があれば重力の異常が認められるので、広範囲に亘って重力探査を行なってみると地域的な構造を知ることができる。世界各地の地熱地域では大構造を知る目的でしばしば重力探査が行なわれているが、わが国でも指宿、大岳・岳の湯（いずれも九州）等の地熱地域で重力探査を実施している。特に大岳・岳の湯では大分地溝帯の存在が重力分布図の上にきわめて明瞭にあらわれている。

I 2-2 地震探査

多額の経費を要することとその解析が難かしいため地熱地域でもあまり行なわれていない。わが国では、岩手県松川で反射法による地震探査を試み、基盤内の地質構造を解析したのが唯一の例であろう。

I 2-3 電気探査

もっとも多く用いられた方法の1つである。特に最近、直流法による比抵抗電気探査が深度1,000m くらいまでの情報をキャッチすることができるようになったので、地熱地域においてはほとんどといってよい位に利用されている。

もちろんこの方法も、地下における電氣的性質の違い、例えば電気の流れやすい地層と電気

の流れにくい地層の境などに注目して行なうのであるから、その差のはっきりしないところでは効果は期待できない。イタリーのラルデレロでは第三紀層（キャップロック）とその下の硬い中生層の境界を電気探査で追跡し、地熱の探査に著しく貢献したことが報ぜられている。

一方、温泉地域では電気探査の中でも自然電位法が用いられる場合が多い。これは、電解質の溶液を含む温泉水が地下に潜在するとき、一般に負の電位を示すということを利用したもので、2点間の電位差を測ることにより電位曲線が画かれるので、経費も安く済み、比較的手軽に調査できるため好んで用いられる訳である。しかし、この方法も異常で出たからといってうのみにすることは危険であり、他の調査を併用してその真偽のほどを確かめることが必要である。

I 3 温度分布調査

温泉が地表近くに潜在する時、温泉のない地域に比べ、地下温泉が異常な値をとることを利用したもので、地熱、温泉探査の場合にしばしば用いられる。

一般に行なわれる方法は、深さ1mないし1.5mの孔を掘り、寒暖計を挿入して温度を読みとって等温線を描くものである。この方法はすでにそのまわりに温泉が自噴しているとか噴気孔があるとかいう場所では効果的であるが、特に地表に温度異常が認められないところでははたして読みとった値が異常であるのかないのか判断に苦しむことが少なくない。特に地表に温度異常が認められない時には、孔の深さを深くし、少なくとも恒温帯（地下30m前後）以下の温度を読みとるようにしなければ効果は少ない。

いずれにしてもこの方法は、温泉ないし地熱が比較的地表近くに存在している時だけしか効果はなく、どの場合でも適用できるというものではない。

I 4 温泉水の化学成分

直接探査に利用しようとするのであれば、むしろ地中に孔をあけ、空気中の炭酸ガス（CO₂）を測定してその含量の異常から温度分布調査と同じように温泉の存在を推定する方法がとられることがある。

また湧水が温泉質の物質を含むかどうかを判定するさい、湧水の化学成分をまず分析する必要があることはいうまでもない。

温泉探査に先んじて、湧水の化学成分を知ることは非常に重要であるが、今のところ、それより先は温泉の探査というより、温泉の成因を究明する手掛りとして化学成分を重要視する傾向が強い。

最近地下に潜在する熱水が対流をおこしているといういわば対流説が1つの風潮として取り上げられているが、はたしてどの温泉、地熱地域でも熱水が対流説に従うような在り方をとっているものかどうか1つの問題点であろう。この究明には、地下における温度分布を知ることと併せて温泉水の化学成分の面からも検討してみる必要があるように思われる。

II 試錐孔による孔内調査

II 1 岩芯の地質調査

多くの場合、試錐孔はオールコアリーグ、またはスポットでコアを採取するのが普通である。これらのコアは直接地下の岩層を示すものであるから、コアの地質調査によりその地域の地質状況、岩石の変質状況等について最も確実な情報が得られる。

温泉地では数多くのボーリングがおろされているにもかかわらず、コアの保存は勿論のこと柱状図すら記録されていないところが少なくない。せっかく多額の経費を投じて掘削するの

であるから、ボーリングの資料が整っておれば次にボーリングをおろす場合に非常に参考になるであろうし、温泉地の地下構造の解明に役立つことはいうまでもない。将来、温泉地におけるボーリングの資料が何らかの方法で保存されるような措置が講ぜられることを望むものである。

II 2 電気検層

地下における温泉水ないし熱水の在り方はコアを仔細に観察しても仲々その関係が掴まれない場合が多い。電気検層は、一般に孔内に泥水を充満させ、比抵抗ならびに自然電位の両方を測定してその結果から、岩層内に発達するクラック、帯水層の存在を知ろうとするものである。

II 3 温度検層

ボーリングの施工中、ある深度毎で孔底の温度を読みとる作業はしばしば行なわれる。いわゆる孔底温度の測定といわれるものである。さらにある深さまで掘り下った時、ボーリングの循環水を停止させ、ある時間をおいて何度も孔内の温度で測定してみれば孔内温度の回復状況から温泉の湧出個所が知られることがある。これが温度検層といわれるものである。

II 4 孔内流速測定

自然湧出の温泉の場合は孔内に温泉水の流れが生じるので、孔内の流速を測ることにより、温泉の湧出個所を知ることができる。水位が低く、孔内に水の動きがない時は、エアーリフトをかけ人為的に孔内の水を動かし、流速を測ってみても大体同じような結果が得られる。

II 5 テストボーリング

地表調査の結果からさらに確実な資料を必要とする場合にはどうしても地下に孔をあけ、地質状況、地下温度に関する資料を集収しなければならない。この目的で行なわれるのがテストボーリングである。

地熱開発を目的とする基礎調査では、まず地下における温度分布、地質状況、地熱のあり方等々を調べる意味で、開発井を掘削するに先立ち、テストボーリングをおろすのが普通である。その深さは場所によって必ずしも同一でないが一般に500～1,000m程度のものである。

これに対し、温泉開発の場合にはただちに開発井の意味をもたせてボーリングをおろすのが一般である。すでに温泉井が掘られているような場所では、特に調査井をおろさなくともその結果が失敗に終ることはないかもしれないが、まったく初めての場所では失敗の方がむしろ多いと考えなければならない。ただ、その結果が失敗に終わったということで止めてしまうか、見掛上失敗にみえてもその結果を生かし次に掘る井戸を成功に導くかは、調査井の取扱いが如何にかかっているといつて過言でない。

今まで説明した事柄は、地熱、温泉の開発を主眼にして地表ならびに試錐孔の調査内容の概要を取上げたものである。ここでは機械的に調査項目を羅列したに過ぎないが、実際の調査に当たっては、その場所の地質条件を勘案し、もっとも効果的な方法の幾つかを組合せて行なうことはいうまでもない。

日本のように地質構造の複雑なところでは、地下における地熱、温泉のあり方は場所によって種々の型式をとるものと思われる。

しかし、その存在型式も整理してみれば、幾つかのタイプに分類できるであろうこともまた予測される。今後は地熱、温泉のあり方を系統的に取り扱うような方向に進むことが必要であ

り、その傾向がわかれば地熱温泉の開発に役立つことはきわめて大なるものがあると思われる。

III 温泉地の一斉調査

温泉地の開発が進むに従って、これと平行して生じる問題は温泉の保護・保全の取扱い方である。

自然状態の温泉はいうまでもなくバランスのとれている状態であるから短時間内に温泉源の涸渇などという問題は生じないであろう。

しかし、一度温泉地にボーリングをおろし温泉の湧出をうながすなら、自然状態のバランスは崩れ、地下の温泉水系になにがしかの変化が生じる筈である。温泉水の取得量が多いと多いほど、その変化もまた大きいことはいうまでもない。

温泉水系におけるこのような変化は、結局温泉水の供給量と取得量との釣合いの問題に帰すように思われる。自然状態における供給量と湧出量のバランスは、一たび人為的に乱されるともはや釣合いをとることはないものであろうか。それとも取得量を加減することによってバランスを取る時点が再び訪れるものであろうか。

現在、わが国の大温泉地の多くは逐年水位の低下を来し、その反面温泉の取得量が増加しない状態に見舞われている。水位の低下はとりもなおさず過剰揚水を意味すると解されるのであるが、このような状態にある温泉地にとってもはや救いの道がないものかどうか、今後の大きな課題であるように思われる。

温泉源の保護保全の問題を究明する上に重要な事柄は、一たびボーリングがおろされてから、現在の水位低下に至るまでの経時的な資料を必要とすることである。

遺憾ながら、数多いわが国の温泉地においてこのような資料の整っているところは皆無といってよい。最近、各県の温泉地で、水温、湧出量の一斉調査を年に1度ないし2度行なわれているが、いま述べた泉源の保護保全の問題を解明するためにも、また保護対策を購ずる上にもきわめて適切な処置といえる。でき得れば、化学成分の一斉分析もこれに加えることがさらに望ましい。

泉源の保護、保全の問題も、結局は温泉の合理的な開発に通じる行政的、技術的内容を含んでいるといっても過言ではない。