

地盤の熱的問題

4. 地熱資源

4.1 地質学的考察

ば ば けん ぞう*
馬 場 健 三

4.1.1 地球の内部の温度

地中の温度は浅部においては、気温の日変化および年変化の影響を受けて変動する。その変動の振幅は土の熱伝導性がよくないので深度とともに一般には急速に減衰する。地盤を単純な半無限媒質と考えて地表との境界の温度が正弦波的に変動した場合、平均的な土の熱拡散係数を考えると、日変化は深度約1mにてまた、年変化については20mにて実用上はほとんど消滅するという結果が得られる。

地下水学においては地下水温の年較差がほとんど消滅する深度を恒温層深度といい、日本ではそれが10～18m程度と観測されており、上記の理論的考察を裏づける結果がえられている。恒温層深度以深では一般には温度が上昇して行く。深度が数kmまでの上昇率は100mにつき3℃という値が地球上各地における平均値としてよく知られている。

人間が掘削した最も深いボーリング孔はソビエト連邦の首都モスクワから北方約1300kmのコラ半島ムルマンクスにあるもので、深度12000mに達する。これは学術研究用として掘削されたものであるが、このほか深い孔としては石油・天然ガス用の井戸として深度9583mのものがアメリカにあり、これに近い深度のものかなりの本数がある。しかし地球全体から見れば、地下温度を確認するには十分の数ではない。ましてや地球の半径約6300kmに比べれば、ボーリング孔はほんの浅い部分にとどまっているのみである。したがって地球内部の温度についての知識の現況は、間接的な方法によって得られたものといえる。

地球内部の温度分布を推定する方法としてよく知られたものは断熱温度分布の推定である。その原理を簡単に述べれば次のようになる¹⁾。

地球上には多くの地震観測所が設けられ地震計による地震の観測がなされている。地震は地球上の極めて特殊な限られた地域に起こるものであるが、地震波は地球の深部に及び、あるものは地球の中心部を通過し地球の反対側で観測される。また深部に至り、反射波あるいは屈折波として地表上で観測されるものもある。これらの観測結果から地球中心からの距離の関数として地震波速度分布が得られる。地震波速度はその岩石の弾性定数と密度の関数であり、結局地球内部の密度分布が求まることになり、それから圧力

分布が知られる。さて物質は一般に圧縮されると外部からの熱の供給がなくても温度が上昇する。外部からの熱の供給がなくまたそれ自身の内部にも熱源がなく、このようにただ圧縮だけの過程を断熱圧縮という。地球は表面から外部方向に熱が移動しているので厳密には断熱圧縮状態といえないが、地球そのものを構成する岩石の熱伝導性はよくないので近似的にその状態を考えてよいだろう。

岩石はおおまかにいえば鉱物の集合体であり、鉱物はまた結晶の集まりである。したがって岩石に圧力が加わると結晶の格子の振動数が増し、内部摩擦により熱が生ずる。比熱の値が分かれば、温度に換算できる。すなわち断熱圧縮によって圧力を受けた岩石の温度が高くなる。

固体比熱論において比熱は地震波速度の関数となっている。地球はいくつかの層状構造をなしており、そのおのこの層内では物質は変わらないものと考えてよい。以上のことからさらにいくつかの妥当と考えられる仮定を加えて、地球内部の地震波速度分布より、地球内部の断熱温度分布が理論的に計算される。

断熱圧縮によりえられる温度勾配は地球内部における最低可能温度勾配を与えるものであることは上の説明より明らかであろう。

また上に述べた地球の層状構造についてはおおまかに区分すれば、地表から数10kmの深度までの表層が地殻部分であり、それより深度約2900kmの部分がマントル、さらにそれより深度約6300kmの中心までが核とよばれる(図-4.1参照)。

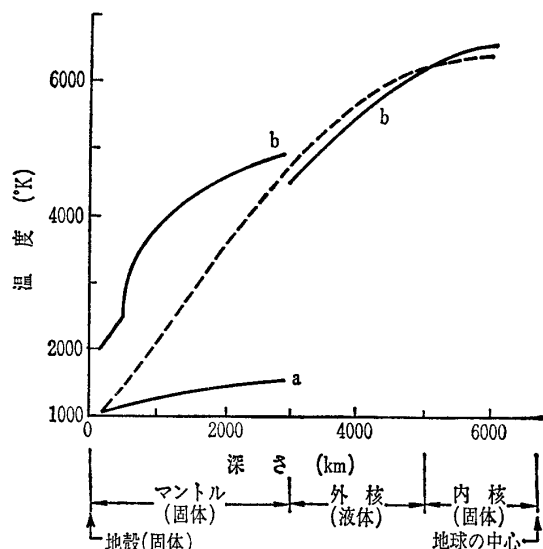
核は深度約5100kmを境として外核と内核とに区分して考えられている。そして外核部分が液体状態にあり、内核部では固体状態にあるとされている。これらはいずれも地震波観測によってえられた知識である。

先に述べた断熱圧縮の考えで、マントル内のいわば最低の可能温度分布が計算された例があり、これによるとマントルの底というべき約2900kmの深度にて1200～1300℃となっている。

以上の最低可能温度の推定に対して、最高可能温度の推定もなされている。これは地球内部の物質の状態が液相である外核部を除いて固相であることを利用するものである。すなわち固体部分の最高可能温度は融点温度である。固体論においては融点温度もやはり、地震波速度の関数として

*東電設計 第一土木本部

講座



図—4.1 地球内部の状態と推定温度分布, a: 断熱温度, b: 融点温度, 点線は推定される実際の温度, ケルビン温度(°K)から273.15°を差引くと摂氏温度が得られる。文献1)より一部引用

与えられている。この推定方法によればマントルの底部の深度約2900 kmにおいて約5000°Cとなっている。融点の推定による温度は液相の外核部ではいわば最低可能温度となり、さらに内核では再び最高可能温度となる。この方法による地球の中心温度は6000°Cまたはそれを少し上まわるとされている。

以上述べたように地球内部に行くほど高温になっている。そして地球表面においては内部方向から外部に向かって熱の流れがある。この量は地球表面の平均的な値として、毎秒1 cm²あたり100万分の1カロリー程度とされている。また太陽が地表に与える熱流はその5000倍以上程度とされている。当然のことながら地表上の温度は太陽の影響によって支配を受けているので、地球内部の温度とは関係がないといつてよい。

見方をかえて地球内部の熱源とは何かの問に対しては次の二つが主な答とされている。第1は地球の始源物体が持っていた重力ポテンシャルエネルギーである。地球は宇宙空間中に存在したいわば小さな塵これを始源物質というが、これが集積して地球が形成され、その形成時に熱エネルギーへの変換が行われた。またその後地球の層状構造が形成されたわけだがこの時の地球内部の物質の再配分にあっても重いものが深い所に集まる過程で熱が発生したと考えられている。第2は地球を構成する岩石・鉱物中には微量ながらいくつかの放射性元素が存在する。主要なものはウラン(U), トリウム(Th), カリウム(K)の3種類である。これらの元素は放射崩壊する時に発熱する。この熱の発生は現在も行われている。

地球創生以来、地球内部に発生した熱のある部分は地球外に流出しているがある部分は内部にとどまっている。しかしそれらの詳細についてはまだ定説がないといつてよい。

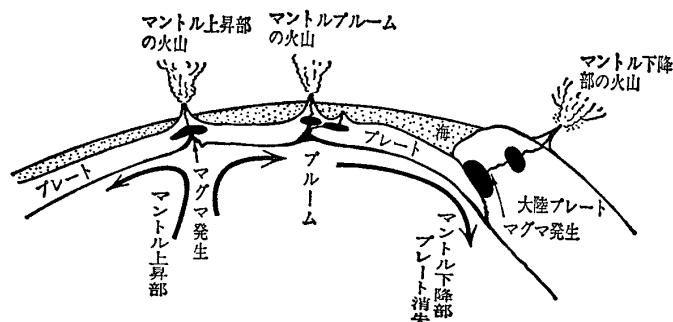
4.1.2 資源形成の地質学的過程

地表上には温泉水あるいは高温の噴気を自然に湧出しているところがある。また自然の湧出がなくても浅い井戸を掘れば容易に温度の高い地下水や蒸気がえられるところがある。このような地域を地熱地域と呼んでいる。

地熱地域の日本における分布および世界における分布を見ると、大略は火山の分布に沿って存在する。地熱地域の成因が火山のそれと密接に関係していることがこれより分かる。

地熱地域においては地下浅部で通常のところより高温になっている。その熱源はほとんどの場合、深部に発生した溶融状態の岩石すなわちマグマが浅部に上昇して来てマグマ溜りを形成していることにあると考えられている。

マグマの発生がどのようにして起きているかについては現在図—4.2のようなプレートテクトニクスによって説明するのが定説となっている。地球の表面の地殻部分は10枚程度のプレートからなり立っている。地殻の下部のマントル上部では高温のため、固体状態であるが年速数 cm 程度の速さの大規模な対流が存在すると考えられている。対流の上昇部では高温のマントル構成物質が圧力降下のため融点に達して融解してマグマとなる。マグマの上昇するところは固いプレートの端の部分にあたり、ここに新しいプレートがつけ加えられることになる。ここにマグマの活動による火山帯を生ずる。マントル上部の対流の下降部がプレートの別の端にあたる。ここではプレートの端がマントルの下降流にのって、隣のとどまっているプレートの下にもぐり込む。ここではプレートが消滅しつつあるわけである。プレートが下降するに従ってマントル近くに至り、高い温度となる。また下降により、周囲岩石との摩擦による発熱があり、これも高温化に寄与する。そして、プレート物質が融解しマグマとなる。地下深部に発生したマグマは岩石中の割れ目を通じて表面方向に上昇し、火山を生むことになる。以上の二つのマグマの発生様式のほかにマントルプルームによるマグマの発生がある。これは上部マントルのある部分が局部的に突出したマントルプルームとよばれる



図—4.2 マントル対流によるプレートの運動と火山の発生の説明図。マントルの上昇部, 下降部およびプルームの各部分にマグマが発生する。それがまた火山を生成する。

高温の部分をもっており、この上を移動するプレートがこれを取り込む。これがマグマとなり火山を作るといっているわけである。

マントル上昇部の火山の例としては大西洋のアイスランドを挙げることができる。大西洋の中央のほぼ南北方向に中央大海嶺とよばれる海底火山列があり、アイスランドはその一部が海上に出ているものである。プレートの沈み込み場所の火山の例としては日本の火山帯を挙げることができる。またマントルプルムによるものとしてはハワイの火山がその例として有名である。

地熱地域の熱源としてはじめにマグマをあげたのであるが、そのようなマグマの存在が考え難いところに地熱地域がある場合がある。これを非火山性と呼んでいるが、これに平均より高い地温をもたらし原因としては地殻の厚さが薄く、高温のマントル部がほかより浅いところにあること、あるいは放射性元素が比較的多い岩石地層があることなどが考えられるが、その原因が十分に解明されたような地域は今のところない。

地熱地域の地下には高温・高圧の熱水または蒸気が存在する。これを地熱流体と呼んでいる。地熱流体の熱源については上のとおりである。流体そのものの起源はその主たる部分が天水と考えられている。地表に降った雨水が地下に浸透し、地下の高温であたためられる。一方マグマ中には水をはじめ揮発成分があるので、マグマの冷却に伴いそれらが遊離し、浸透水に加わる可能性もあるが、そこで付加される水の量はごく小さい比率のものと考えられている。海岸近くにある地熱地域の地熱流体は海水の浸透水が主たるものである場合もある。

地下水の深部への浸透、温泉・天然蒸気の噴出などには岩石・地層中にある割れ目が大きな役割を占めると考えられている。地熱流体の生成のシステムを熱水系と呼んでいるが、熱水系の形成にこの割れ目の存在は極めて主要な役割を果たしている。

温泉や噴気の湧出があるところでは、流体の温度および化学成分の影響で地表付近の岩石が粘土化し変質する場合が多い。

また熱水が湧出する場合、深部において高温状態にある時は周辺岩石より珪酸(SiO_2)を溶解して流体中にとり込んだものが浅部にくるに従い温度が低下して、これを析出し地層中の空隙を充填する。粘土化の場合および珪酸の析出の場合、いずれも岩石の透水性を小さくする方向となる。これを地熱地域の自閉作用と呼んでいる。

したがって地熱地域では自閉作用のため地表上に見られる流体の湧出はそれほど優勢ではないが深部には高温の流体が多量に存在する場合もある。ともあれ、まとまって高温の地熱流体

が地下に存在するところを地熱貯留層という。

地熱貯留層に直接に到達する井戸を掘り、これから高温高圧の蒸気を取り出し、発電に利用する方式が現在行われている地熱発電であり、その歴史は古い、近年石油危機がいわれるようになってにわかに脚光を浴びた。すなわち地熱流体がエネルギー資源として注目されるようになった。現在地熱資源はエネルギー資源として扱われているのが一般であり、ここでもそれに従うこととする。

4.1.3 地熱資源の分類

日本における地熱資源の利用は温泉の浴用利用という形態で古くから、また広く行われている。全国にある温泉旅館などの施設で用いられている温泉の湧出量は自噴しているもの、動力を用いて汲み上げているものを合わせて、10万トン/時間を越える流量である。温泉の浴用利用は流体温度が約40℃以上あればよいが、地熱流体を発電に利用する場合は普通には200℃以上が必要となる。

地熱資源の分類についてはまだ確定したものはないといっているが比較的よく用いられるものとして表—4.1を掲げた。

まず成因的に2大別して考える。すなわち、新しいマグマ貫入に関連して生成されたものとそうでないものとである。マグマの生成貫入の時期としては地質学的に新しい時代のみを考える。すなわち絶対年代では大略500万年以降と考える。それ以前のものでは十分冷却されてしまっていると考えられるからである。

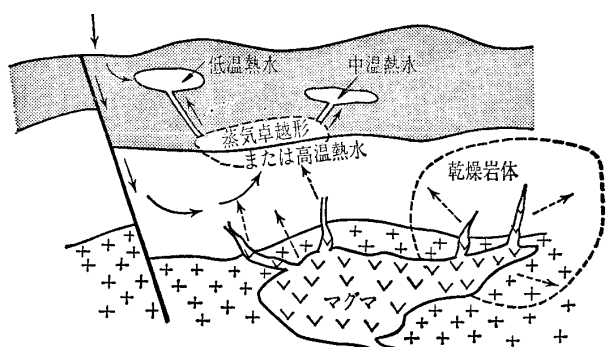
以下に表中にある各種類について図—4.3をも参考にし若干の解説を加えることとする。

最も温度の高いのはマグマそのものを資源と見た場合である。しかしマグマそのものをエネルギー源として直接利用した例は今のところない。マグマ溜りは普通火山の下約10 km以深にあると考えられているのでその利用には難しい問題があるが、その保有する熱量が大きいので将来のエネルギー源としては是非考えられるべきだとの観点で一部の研究者が研究を行っている。水を含まない岩石のかたまり

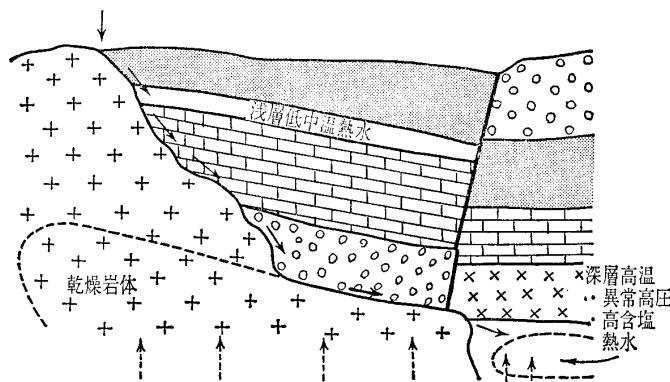
表—4.1 地熱資源の分類

資源の形		温度(℃)	開発段階	利用形態	発電方式
新しい マグマ	熱水対流系				
	低温熱水形	— 90	実用化	直接利用	
	中温熱水形	90—150	実用化	発電、直接利用	バイナリー発電
	高温熱水形	150—240	実用化	発電、直接利用	ダブルフラッシュ発電
	蒸気卓越形	240—	実用化	発電、直接利用	シングルフラッシュ発電
	乾燥岩体系				
	低温岩体形	—240	未着手		高温岩体発電
その他	高温岩体形	240—650	研究中	発電、直接利用	
	溶融マグマ系	650—	基礎研究	発電	
	浅層低中温熱水系	—150	実用化	直接利用	
	深層高温熱水系	150—	研究中	発電	
	異常高圧熱水系		基礎研究	発電	
	高含塩熱水系		実用化	発電	

講座



(a) 新しいマグマ貫入に関して生成された地熱資源の説明図
実線矢印は流体の流れを示し、点線は熱の流れを示す。
熱源としてのマグマが地下深部に存在する。水のないところは乾燥岩体を形成する。マグマの熱と地下に流入した水により、蒸気卓越形または高温熱水の貯留層が形成される。あるいは上部に蒸気卓越形、下部に高温熱水の形成が考えられる。浅部の低温熱水形では地表近くの低温地下水の混入が考えられる。



(b) 新しいマグマ貫入に無関係の場合の説明図
矢印の説明は(a)に同じである。水のないところに乾燥岩体が形成される。深部に貯留されているものには深層熱水、あるいは異常高圧、高塩熱水が存在する。

図—4.3 地熱資源の説明図

のである。また高温の熱水として貯留層中に存在するものを高温熱水形という。地下深部の圧力下で液相として存在するが、この熱水を井戸を通じて地表に導くと井戸の中を熱水が上昇するに従い、圧力が低下し一部が気化して気液2相流となる。この形も発電に用いられる。

貯留層の温度が低くなるに従い中温熱水形、低温熱水形と分類されている。これらは井戸を掘っても自噴しない場合もあり、その場合は動力により汲み上げて利用される。温度が低いので発電以外の目的に利用されるのが通例であるが特別の方法で発電に用いられることもある。新しいマグマ貫入に関係はないが、地殻中の地温が平均より高温のところがあることは既に述べたとおりである。

マグマ貫入に関係しないが、地温がなんらかの原因で高くなっている所に地層中の割れ目や孔隙が豊富であれば地下水は深く浸透し、深部の地温によってあたためられる。これを深層高温熱水系とよんでいるが、その貯留層内の流体の圧力はほぼその深度の静水圧に等しいかそれを若干上回る程度である。しかしながら、その深度の静水圧をはるかに越える異常高圧を示すものがアメリカのメキシコ湾岸の堆積盆地あるいはハンガリーのカルバチア盆地の深部で発見されている。これを異常高温熱水系という。

また特に塩分濃度の多い熱水の場合を高塩熱水系という。これはアメリカのインペリアルバレーの地熱地帯がその代表的例であり、海水の10倍程度の溶解塩を含んでいる場合がある。

なお表—4.1の中の各分類資源の開発段階、利用形態、発電方式などについては次号の4.2の地熱発電の項で解説される。

4.1.4 日本における地熱資源の分布

前項に地熱資源の分類について述べたが、その内当面重要なものは熱水系に属するものである。したがって熱水系資源を中心として以下に解説することとする。

地熱地域の分布は火山の分布と密接な関係があるが、火山帯そのものが地熱地域とはならない。

地下になんらかの地熱活動が存在することによって地表に現れる徴候を地熱徴候とよぶ。温泉の自然湧出はその一例である。その他湯沼、自然噴気や噴気地がある。また噴気の噴出などがなくても地温が普通のところより高いため、雪がとけやすいという現象も地熱徴候とよばれる。先に説明した地表および地表近くの岩石が熱水変質したものも地熱徴候とよんでいる。この場合地表付近では特に地温が高いという事もないことがある。

図—4.4は我が国における地熱地域分布図³⁾として比較的良好に用いられるものである。

ここには85の地熱地域が示されている。これは地質調査所によって作成されたものである。これらの地域は70℃以上の高温の温泉（自噴あるいは井戸による汲上げ）が認め

を乾燥岩体と名づけ、そのうち特に高温のものを高温岩体といい、その熱エネルギーの利用が現在研究されている。高温岩体中に井戸を通じて水を送り込む。岩体の高温により水が温度を獲得する。このようにして生成された人工的地熱流体をもう一つの井戸を通じて取り出して発電に利用する方式が考えられている。現在のところ商業的な実用化は難しいが、この方式の対象となる岩体の分布は地球上にも広く、またもちろん我が国でも多いので現在内外で研究が進められている。高温岩体の利用形態は先に説明した熱水系が天然にできていないところに、いわば人工的に熱水系を作り地熱エネルギーを取り出そうとするものといえる。現在熱抽出の研究対象となっている岩体温度より低温のものも将来熱抽出の対象となりうるのをこれを低温岩体形として区別している。

表中の熱水系と分類されているものが現在利用されている地熱資源である。蒸気卓越形というのは地下の貯留層中で流体が飽和または過熱状態の蒸気として主に存在するものである。地熱発電のために利用するのに最も好都合のも

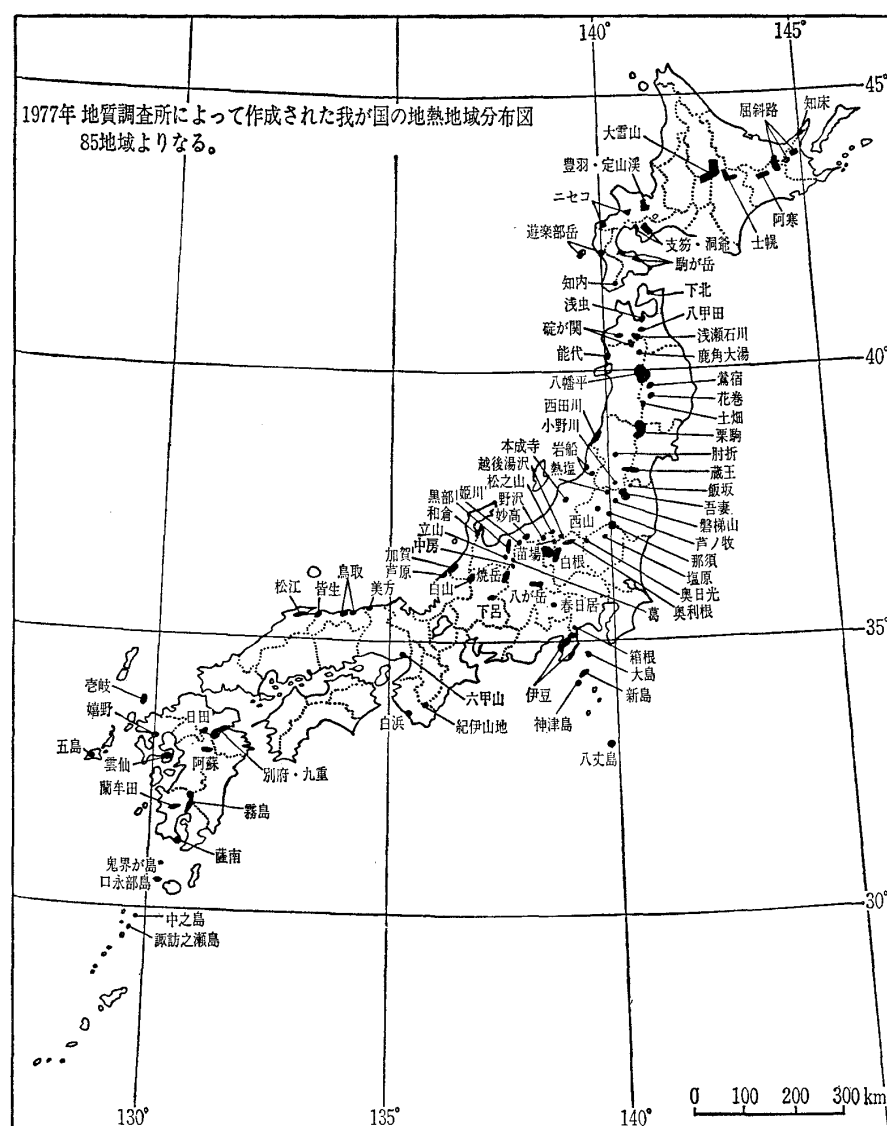


図-4.4 日本の既知の地熱地域分布図

られるところ、または面積 1 km^2 以上の熱水変質帯がある場合には 50°C 以上の温泉のあるところを抽出し、1 地域の面積を 50 km^2 またはその倍数として囲ったものである。

これらの地熱地域は経済的な開発が可能かどうかは別として、地熱資源の存在が確かなところであり、いわば既知の地熱地域である。一方地表の地熱徴候が乏しい、または全くないところでも、地下深部に地熱資源が存在する未発見地域もあると考えられる。

地下深部の調査を行う方法として、ボーリング調査は莫大な経費を要するのでそれを多く用いることは難しい。そこで各種の地表調査が行われるのであるが、その方法には物理探査法と地化学調査法がある。その各々の方法にはまた各種の方法があり、新しい地熱有望地域を見いだすのに用いられている。

地下深部の高温状態を調査する物理探査の方法としてキュリー点深度調査とよばれる方法がある。この方法は日本全域の地熱地域の分布の調査の一環として行われたことがある。それを以下に解説する。

一般に岩石はしばしば強磁性鉱物を含んでおり、強磁性体と見ることができるが、これらの鉱物はほぼ 570°C でキュリー点温度という強磁性でなくなる温度をもつ。地下 20 km 位の深度でこの温度に達するのが普通であるが、地熱地域では数 km の浅いところで既にその温度になっていると考えられる。地表上の磁界の分布を飛行機に磁力計をつけて測定する。その結果から強磁性がなくなる深度の分布を解析する。これはまた 570°C の等温線の深度を求めることになる。

この方法はこれまでのところ直接の地熱資源の探査には効を奏していないが、地下温度のリモートセンシングによる調査法として今後の有力な調査法の一つと考えられている。

この方法による全国のキュリー点深度分布の図が新エネルギー総合開発機構の地熱調査の結果の一つとして作られている。

現在行われている地熱発電のための地熱流体採取用の井戸の深度は 1000 m 程度のものが多いが、深いものでは 2000 m を越えるものもある。その深度はその地域の貯留層の深度によるが、あまり深いものは井戸の掘削費用が大きくなり、経済性がなくなる。現在のところでは高々 $1000 \sim 2000 \text{ m}$ 深度程度

までにある貯留層の発見・開発がめざされているといつてよい。

地熱地域における地下の貯留層の探査にあたっては、最初に地表調査としての物理探査および地化学探査が行われる。後者の代表的方法としては、土壌中のガスを採取して炭酸ガスおよび水銀濃度を調べる方法をあげることができる。いずれもその直下深部に地熱流体がある場合、濃度が高くなるのが一般に知られている。ついで数 100 m 深度の調査井をいくつか掘削し、有望とあればさらに深い調査井を掘削して貯留層の存在とその性状を調査するという手順をふむのが通例である。

我が国における高温岩体、深層熱水などの資源の分布に関する組織的調査は今までのところ行われていないが、既存の各種データを用いて一応の全国規模の図は発表されている。しかし今後その資源の本格的開発にあたってはさらに詳細な調査が必要となろう。

マグマについては、その存在深度は 10 km 以深と考えられており、これまでのところ我が国では確認された例はな

講座

いといってよい。利用方式の研究と同時にその存在の調査も今後の研究課題である。

4.1.5 地質工学から見た特記事項

(1) 温泉余土

地熱流体の熱と化学成分の作用により岩石が変質することは地熱現象のもたらす特徴的なことである。特に温泉変質と称して我が国では古くより知られている。標題の温泉余土はそれを表現する我が国特有のものと考えられる。温泉余土は温泉変質粘土であり、熱水、蒸気あるいは火山にしばしば見られる硫化水素 (H_2S) や亜硫酸ガス (SO_2)、これらを火山性の硫黄と呼ぶが、これらによって岩石が粘土化したものの総称を意味する場合と、そのうち特に酸性泉で生じた粘土化帯のみに限定して使用される場合がある⁴⁾。

火山性の硫黄は結局酸性温泉となり、いずれにしろ酸性の地熱流体は岩石を溶脱し、珪酸とアルミナを主成分とした粘土を形成する。余土の意味がいわば後に残った土の意味とすればまさにこれを示すに適當である。中性ないしアルカリ性条件では熱水中に溶解している物質がむしろ沈殿する傾向があるから、これに余土の語はどうかというのがその理由でもっともであろう。

しかし土木地質の分野では必ずしもこのような区別をした使用はなされていないようで、広義の温泉変質粘土に対して用いられている例もある⁵⁾。

地熱流体が中性、アルカリ性である場合はモンモリロナイト、沸石などの変質鉱物が主に形成され、酸性環境下とは異なってくる。そして温泉余土は膨脹性を示すことで知られる。トンネル工事において温泉余土による著しい膨脹性土圧と発熱が大きな困難となった例は有名である。

温泉余土地帯における土木・建築上の問題としては、地盤強度の低下、温泉地すべりの発生、酸性化に伴うコンクリート構造物の腐食などがあげられる。

(2) 高熱隧道

我が国においては全国的に地熱地域が分布するので、ト

ンネル工事がそこで行われる例も多い。前述の余土の問題のほかに異常地温と温泉水の湧出は工事を進める上に大きな困難となる。歴史的に有名な例としては黒部第3発電所建設の際、阿曾原谷と仙人谷間のトンネル掘削である。この工事については作家吉村昭の有名なノンフィクション作品「高熱隧道のメインテーマ」となっているが、そこに述べられた数字をあげると次のとおりである。全長904mのトンネルは昭和11～15年に工事がなされたものであり、阿曾原谷側からのトンネルが工事着手早々に65℃の岩盤に遭遇し、高温の悪環境下で掘り進んだが、遂には最高165℃の岩盤温度に出会ったと記録されている。

そのほか、八幡平地熱地域内にある葛根田地熱発電所近くの水力発電所用のトンネルも高熱隧道として有名である。また同地域内では秋田県側の小和瀬発電所建設工事における高熱隧道もよく知られている。ここでは延長650mの工事中132℃の高温の記録⁶⁾がある。

最近では岐阜・長野両県境の安房峠に計画されている国道トンネルが高熱隧道として有名である。現在調査坑が掘削されているところであるが、75℃の温度が記録されたところがある。また温泉水の湧出も当然懸念されている。本工事のときには地熱が難問の一つを提供するであろう。

以上説明したところはいずれも地熱が我々にとって厄介な問題を提起するものである。

地熱資源開発に開発研究された技術は当然のことながら厄介な問題の解決に応用が可能と考えられる。またその努力も行われつつある。

参 考 文 献

- 1) 早川正己：地球熱学，東海大学出版会，pp.15～17，1988.
- 2) 馬場健三：電気・電子工学大百科，13巻1編，オーム社，p.64，1984.
- 3) 地質調査所：日本地熱資源賦存地域索引図，地質調査所，1976.
- 4) 大木靖衛：温泉余土—温泉と粘土鉱物—，土と基礎，Vol.23，No.9，pp.63～64，1975.
- 5) 落合英俊ほか：温泉余土と基礎工，土と基礎，Vol.36，No.3，pp.61～66，1988.
- 6) 加瀬田英男：小和瀬発電所建設工事における高熱隧道，発電水力，No.52，pp.51～57，1961.