

地 熱 の 探 査

—とくに物理探査の役割と可能性—

ま え が き

日本には多くの火山帯があり 活火山 休火山 噴気孔 温泉などがたくさん存在する。1947年から地質調査所により 地熱の調査が始められた。

初期の時代には 自然噴気地帯において 主として地質 地化学 地温調査が行なわれ さらにある区域においては簡単な物理探査と試錐により 地下浅部の状態の探査も行なわれ ある程度の地熱噴気をつかむことができた。しかし これらの方法では 浅い所の探査のみで深部の地熱構造を知ることは困難である。

このような地熱地帯において いくつかの深掘りの井戸が掘られたが 深部から噴気を得ることはできず 浅部から熱水を得た程度で 成功しなかった。したがって地熱探査においては 深部地熱構造の探査が重要な課題となってきたのである。これを解決するためには地熱地帯の地質構造を明らかにする地質精査 深部構造を探査するための物理探査 試錐 坑井内物理検層 噴気測定等が必要となってきた。

最近 岩手県松川地熱地帯においては 地質精査 地震探査法 電気比抵抗法による物理探査 物理検層がこの地熱地帯の地下構造を明らかにするために行なわれた(地質ニュース No.80 参照) 一方 地熱構造の問題として 活火山において 火山の構造が研究されてきた。



伊豆大島三原山の噴火 (32.11.20 撮影)

昭和新山は1943年の終りから1945年9月にかけて 新たにできたドームである。浅い所に岩しょうが貫入した結果 有珠山の北東部に当たる農地の一部が持ち上げられドームができたが その高さは屋根山から 150m 基準面から約 300m である。

この特殊な火山は われわれが地下の岩しょうの性質を知るうに よい試験台を与えたのである。このような観点から 地質調査 地化学調査 物理探査(重力 地震 磁気 電気 放射能 地温等の探査)などが行なわれた。これらの結果 興味ある種々の資料が得られたのみならず 800°C以上と推定されるドームの岩体が屋根山の内部から南の方に延びていることが 物理探査によって明らかにされた。このような高熱の岩体と母岩に含まれる地下水との接触部における地熱状態は 今後解決しなければならない問題であって さらに探査を進めることが期待されている。

他の探査は 東京の南方 大島火山において行なわれた。大島火山は複式活火山で 中央火口丘三原山がその中にある。ここでは多くの火山活動があり 厚い火山噴出物でおおわれている。この火山において 重力と磁気の方法による地球物理学的の研究が行なわれた。これらの研究の結果から 岩しょう留の位置は噴火口の下2~3kmの所にあることが推定されている。しかしこの火山は厚い火山噴出物でおおわれ 地表付近にはほとんど水がない。したがって 噴気 温泉等の地下の地熱に関する地表での示徴はほとんどない。地下の高温体と地下水の接触部における地熱状態は 地熱蒸気を得るカギである。

この地域の火山堆積層における地下水の分布および構造を明らかにするため 電気比抵抗法が行なわれた。この結果 カルデラ内の地下水は 地表から 250m 以上の深さに存在し カルデラに関係する構造が明らかにされた。地下水を確認するために行なわれた試錐では 地熱の徴候が認められ 温泉が発見されている。今後の探査により この火山の地熱状態が明らかにされるであろう。

以上述べたように 日本の地熱地帯においてはある程度探査が行なわれたが これらは地熱の開発という点から見ると まだ概査程度のものであって 今後の探査の発展が望まれている。

地熱探査の方法

日本においては 地熱温泉徴候は数多く認められているが これらのおもなものは すでに温泉として広く開発・利用されている。したがって発電のために地熱を利用するには 新しい地域の開発を行なわなければならない。また永続性のある地熱を確保するためには 浅部だけでなく 深部の地熱状態を探査する必要がある。地熱エネルギーを経済的に開発・利用するためには 能率的な地熱探査技術の発展に依存する面が非常に多い。

現在石油の開発技術が世界的に大きな発展をしているのは 油田探査技術のすばらしい進歩により 砂ばくや海底下の油田すらも どしどし探査開発されているからである。

今までのところ 世界において地熱探査の普遍性ある技術は まだ十分確立されていないようである。

地下の地熱状態を探査する問題は 地熱状態に関連する要素を総合的に研究することによって解決されるであろう。これらの要素には **地熱の熱源 通路 入れ物 地熱に関連する現象**等が考えられる。そしてこれらを探査するための探査要素としては **温度分布 地熱変質帯の分布 孔井による噴気 噴気の化学的性質**等である。次に これらの探査要素を明らかにするためには 次のような順序により 組織的に探査を行なうべきである すなわち **地表の地熱徴候に対する調査 地質調査 物理探査 試錐 検層 噴気測定**等である。

地表地熱徴候調査は地熱地帯の概査である。この調査においては 地表地温測定 地化学調査 簡単な地質調査が普通行なわれ 時には簡単な物理探査 浅い試錐も行なわれる。しかし これらの結果は 浅所の地熱の状態を探知し得る程度のものである。日本の地熱探査の初期の時代においては 探査はこの種のものに限られていた。

地下の地熱構造を明らかにするためには 地熱地帯およびその周辺の地質調査が重要な方法となる。地質調査は地層の堆積状況 岩石の性質 褶曲断層割れ目等のような地質構造を明らかにするのに有効である。

日本においては 5万分の1の地質図幅が地熱地帯の地質資料として用いられ

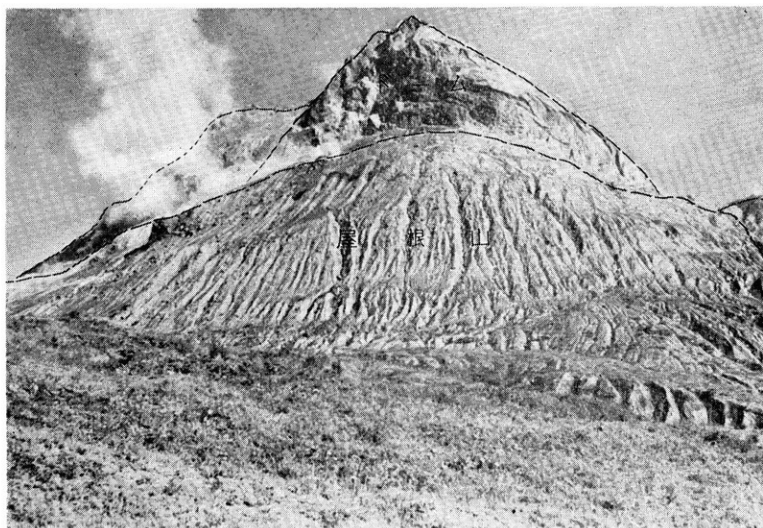
ているが 特定の区域においては 地熱探査の目的のために とくに詳しい地質調査（たとえば1万分の1）が行なわれている。

物理探査は 地下の地熱状態の探査に重要な役割りを果たすであろう。これは地下の地質構造の探査のみならず 地熱に関する徴候や地下水の探査にも用いられる物理探査は油田構造の探査におおいに利用されているが 地熱構造の探査は油田の場合に比べ ある程度むずかしさがある。普通日本においては 地熱地帯は火山地帯にあり地形や地表付近の不規則性が 調査の能率や成果を制約している。しかし火山地帯に適する調査法や詳しい調査の実施によって これらの不利を補うことができるであろう。

私たちは種々の物理探査によって 地熱変質帯や熱源としての岩しょうの探査 また火山地帯における地下水分布の探査の可能性を明らかにした。物理探査を実施するに際し 空中探査以外は地表探査が行なわれ観測された値の分布が解析される。しかし活火山においては地球物理学的量の時間変化が岩しょう留に関する情報を示し得る場合がある。

しかし 地表からの調査のみで地下の地熱状態を十分解明することはむずかしい。したがって調査地域に試錐を行なうことが必要となってくる。孔井内の温度検層 電気検層 その他の検層 岩芯分析等は地下の地熱状態に関する情報を与える。もし孔井の条件を変えて観測を行ない得れば さらに多くの情報を得ることができるであろう。

地表からの調査結果および孔井内の検層結果は 孔井から得られる噴気の観測結果と共に 地熱エネルギーの評価のために必要なものである。



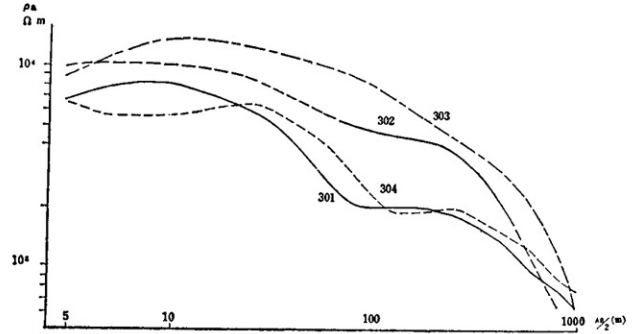
物理探査

地熱の探査においては 物理探査が孔井内検層と共に 重要な役割りを果たすものと考えられるようになってきた 現在まで わが国においては 物理探査は試験的規模で行なわれた程度で 大規模にはまだ実施されていない 地熱探査における物理探査の結果には有効なものがあるが探査技術の点で多少のむずかしさもある しかしこれらの困難性も技術の発展と共に解決されるであろう

電気探査比抵抗法

電気比抵抗法は 地熱変質帯 地下水 地下構造の探査に適用される。

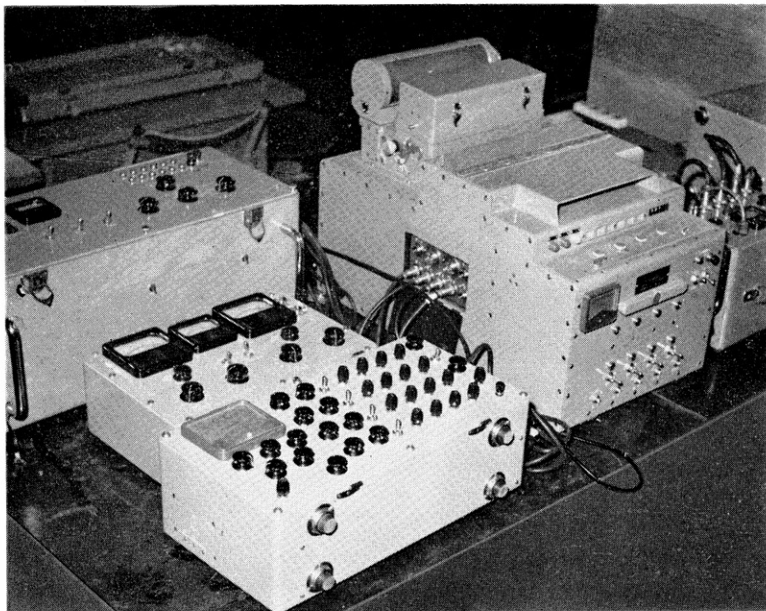
地熱変質帯には周囲の母岩に比べ 低い比抵抗値を示すものがある。九州の地熱地帯の噴気孔付近や岩手県松川におけるものは $10\Omega\text{-m}$ 以下の低比抵抗値を示し これらは高温水によって飽和された粘土化岩石に相当する。昭和新山においては 高度の変質岩石を見ることはできないが 岩しょうの貫入によってできた屋根山における比抵抗値は $10\Omega\text{-m}$ 程度で 低比抵抗を示し 一方 他の場所においては 比較的高比抵抗を示している。この原因は 温度の高いことやその他の要素によって説明されるであろう。



三原山カルデラ内VES曲線の特性 (小野による1959)

地熱地帯においては 地下水の分布を明らかにすることは重要な問題である。しかし 地下水を直接に知ることは容易ではない。普通の場合には 比抵抗法によって地下構造を探索し これらの結果から 地下水の分布を推定している。しかし 大島のように 厚い火山堆積物でおおわれた活火山地帯においては 比抵抗法によって 直接地下水を探索することが可能である。火山堆積層は非常な高比抵抗値を示すが 水を含む時には 比較的低比抵抗となる。現在まで この火山においては 数 100m までの地下水 地下構造が比抵抗法によって 探査されている。

電気比抵抗は 地熱探査において主要な役割りを果たす。時にはこの方法によって探知された地熱変質帯が 地熱徴候と一致する場合があるが しかし必ずしも地熱噴気存在を示すものではない。これらは地熱に関連する他の要素と共に検討することが必要であろう。



電気検層器



電気探査

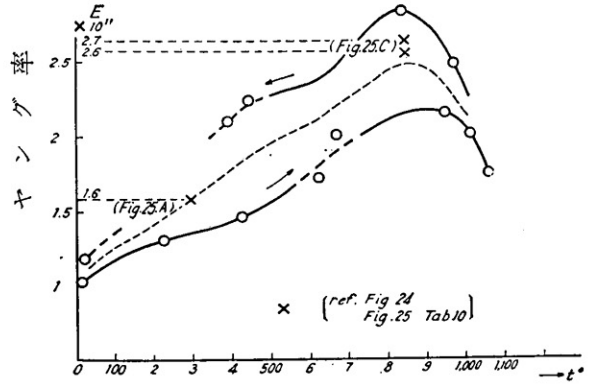
地震探査

地震探査は地下構造 特別の場合には 地下の岩しよの分布の探査に適用される。

岩手県松川地熱地帯において 磁気録音式地震探査装置を用いて 地震探査の反射法が行なわれた。私たちはこの地域の地下構造 すなわち新第三紀の堆積層や基盤からの反射情報を得ることができた。しかしカルデラに接した破碎帯においては 反射波を得ることができなかった。したがってこのような火山地帯においても 破碎帯を検出することは可能のようである。しかし 地表は火山の岩屑でおおわれ 地形は急しゅんであるので 調査は普通の場合に比べて容易ではない。

地下の岩しよの性質や分布を調べるために 昭和新山の周辺および南方において 地震探査が行なわれた。これらの結果 ドームの内部の地震波の速度は 約4 km/sec. と推定された。一方新しい溶岩を採集して 室内において超音波の伝わる速度を測定すると 約2.5 km/sec. の値を得た。

このように 野外の自然状態における測定と 採集試料による室内測定との間に 大きな違いのあることがわかった。新しい溶岩を室内実験によって 高温(約800~900°C)状態で Young 率を測定すると 室温の場合に比べ 約2倍の値となる。したがって もし密度が変わらなければ 高温における速度は室温の場合に比べて 1.4~1.5倍になるはずである。言い換えれば 2.4 km/sec. (室温の場合) から4.0 km/sec. (800~900°Cの場合) に変化する。最近 この事実は室内実験でもたしかめられた。これにより野外において得られた結果は 貫



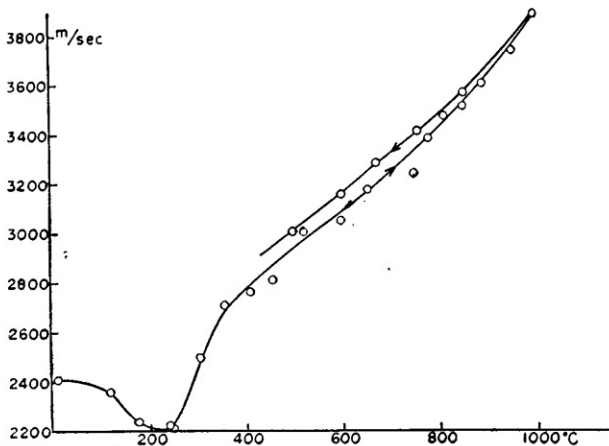
温度上昇による昭和新山新溶岩の弾性変化(佐久間による1954)

入した岩しよがまだ非常に高温であることによって説明される。この推定は 地温探査や磁気探査によっても確かめられている。この仮定により 地震の屈折法反射法によって 高温の岩体が下にもぐりこみ南の方に延びていることがみいだされた。

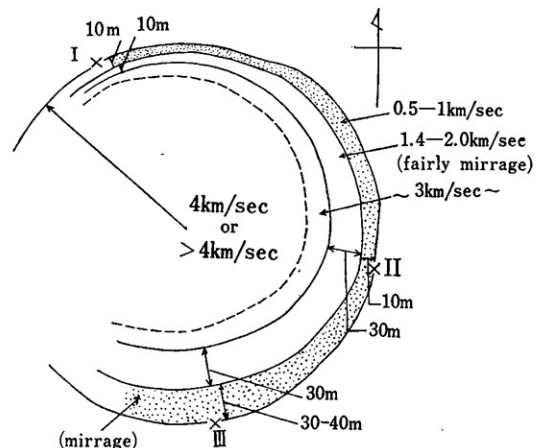
これら2つの例から見ると 地震探査によって地下の地熱構造を探査することは 大変有望と考えられる。

しかし一般的にいえば 現在ではまだいくつかのむずかしさがある。火山地帯における複雑な様相は 観測の面においても また解釈の面においても多少の困難を伴う。したがって 火山地帯に適した探査技術の促進と綿密な調査の実施とが必要となってくる。

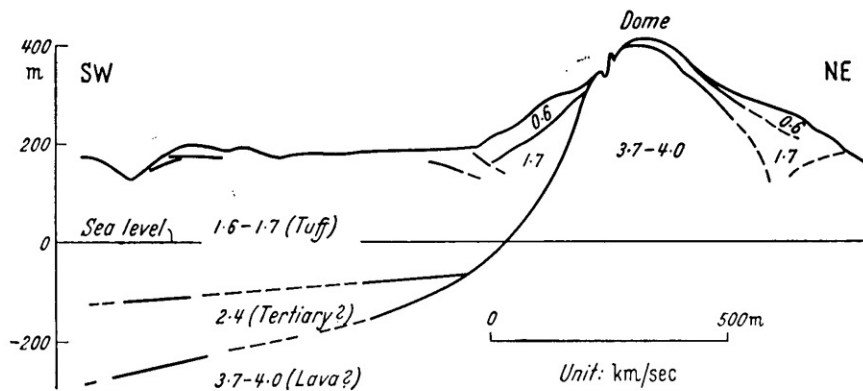
活火山における岩しよの活動に関し 種々興味ある現象がある。火山地震はその1つの例である。火山地震の観測が日本の2・3の活火山において行なわれている。浅い火山地震の震源の分布は 地熱構造に関する興味ある問題を与えている。これらの結果は まだ実際には十分利用されていないが 活火山における地震観測は 将来地熱探査の1つの方法として用いられるであろう。



温度上昇による昭和新山溶岩の地震波速度の変化 (下鶴による1960)



昭和新山ドーム内(首部)における地震波速度分布図 (早川による1954)



地震探査による
昭和新山の火山
構造
(早川による1954)

重力探査

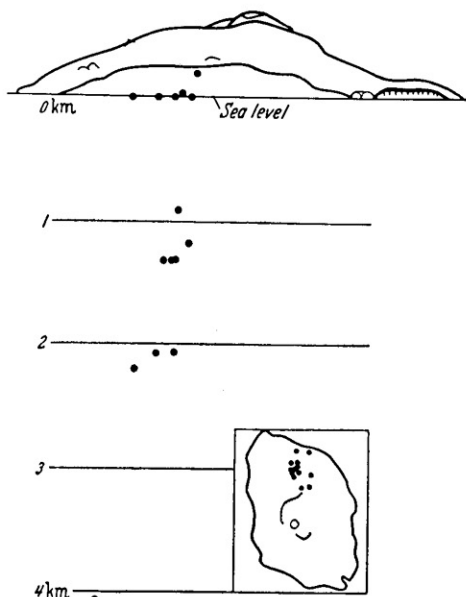
重力探査は 種々の目的の地下構造探査に用いられている。しかしこの方法は 地形の不規則性の影響を受けやすいので この方法を山岳地帯において適用することは容易でない。一般に 日本の地熱地帯は山地に存在しているので 重力探査の適用は制限をうけている。しかし 昭和新山や大島のような活火山においては 火山構造に関する資料を得るために適用され ある程度有効な成果を得ている。

昭和新山の重力探査の場合には 地形補正のための密度分布 フリーエア補正のための重力の鉛直傾度を確かめることが必要であった。この2点を十分吟味して最も合理的な重力のブーゲー異常を得ることができた。この結果によると 昭和新山のドームにおいて 重力異

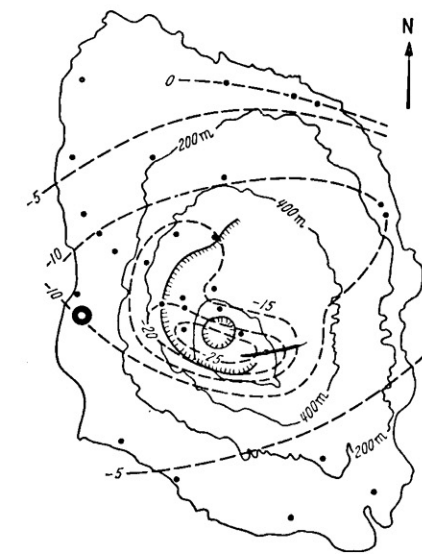
常は最も大きく 屋根山から南方に高重力域が分布していることが認められ 同時に行なわれた地震探査の結果とよく一致している。

重力探査によるもう一つの調査研究は 大島火山の爆発に際して行なわれたものである。

すなわち 1950年9月から 1951年4月の間に 大島火山に起こった火山爆発に際し 広く分布した50の観測点において 4回の重力測定が行なわれた。火山爆発による垂直地形変動を考慮して 水準測量は3回行なわれた。地形変動の影響は 重力にして 0.07mgal 程度のものであって 観測された重力変化に対しては無視しうるものである。火山の活動の前後において重力の変化が認められ これらは地下の質量分布の変化に関連するものである。最大の重力変化は カルデラ内において約0.3 mgal の値であった。地下の質量変化の位置は ほぼ深さ2kmのところであると推定されている。



大島における火山地震の震源分布
(高橋 永田による1936)



大島の1950年の噴火に伴う伏角の変化
(力武による)

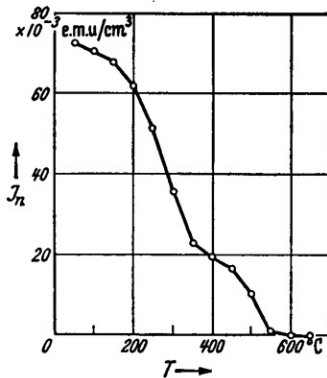
磁気探査

磁気探査は 岩石の間にはっきりした磁性の差があれば それらの構造を出すために適用され 実際に多くの分野で用いられている。 火山岩の磁性は必ずしも非常に強いわけではないが 他の岩石に比べれば強いものである。 そのため 時には地表の火山岩の不規則な分布が探査を妨害することがある。 このような不利な条件は 空中探査の方法で解決できる可能性がある。 日本においては 飽和鉄心型磁力計 最近では核磁力計を用いて 試験的な探査が行なわれている。

火山岩の磁性は おもに熱残留磁気 一部は感応磁気によるものである。 この磁性は温度の上昇と共に減少し キューリー点 (約600°C) を越えると消滅する。 この性質は 地下の高温体の構造をみいだすのに用いられる可能性がある。

たとえば 火山の活動時において 地球磁気の異常変化を伴うことが考えられていたが 1950年に始まった大島火山の活動に際し 信頼されうる資料が得られたのである。 磁気の伏角の測定が 火山およびその周辺において 爆発の種々の段階にしたがってくり返し行なわれた。 これらの結果を比較すると 磁気の変化は 深さ5 kmの所に存在する半径2 kmの球状物質の磁気の消滅に相当すると推定されている。

温度800°C以上の高温体の潜在が考えられる昭和祈山において 磁気探査が行なわれた。 昭和祈山のドームにおける鉛直磁気異常は 隣接の地域よりも小さな値で



大島溶岩の冷却に伴う熱残留磁気の発生 (永田による)

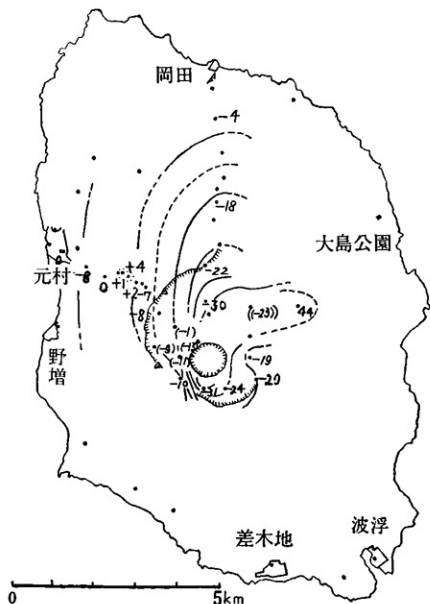
あり また 伏角測定も同様の傾向を示している。 一方すでに冷却していると考えられる大石ドームにおいては 大きな伏角の値を得ている。 これらのことから昭和祈山ドームの内部では高温のため 磁化していないことが推定される。 これは 地震探鉱の結果と一致するものである。 この火山地帯においては 地形的影響をうけるので 地表磁気探査のみから 地下構造を定量的に推定することは困難であった。

火山岩は熱水作用によって変質される。 日本の地熱地帯には 熱水変質帯の分布がみられるところが多い。 これらの岩石は熱水変質作用によって その中に含まれていた磁性鉱物を消失して その磁性が弱められる。 九州地方の地熱地帯の磁気探査では 熱水変質帯において鉛直磁気異常の減少が観測されている。

むすび

日本においては 多くの火山 噴気 温泉等がある。 しかし 私たちは発電のための有効な地熱エネルギーの開発には まだ成功していない。 地表付近の地熱微候のみによって 地下の地熱状態を推定することは むずかしい問題である。 そのため 地下の地熱状態に関する調査研究が 地熱開発に際し 最も重要な問題となっているのである。

この問題に関し 物理探査と試錐坑井における調査とは重要な役割りを果たすものといえよう。 この報告においては 物理探査による地熱探査の可能性について 従来行なわれた結果をもととして述べた。 もちろんこれらのうちには 現段階では多少の困難を伴うものもある。 しかし今後私たちが地下の地熱状態に関する実態をより明らかにし 地殻における地熱状態に関する理論および地熱地帯における探査技術の発展をはかれば わが国において 地熱エネルギーを有効に開発することは期待されるものといえよう。(物理探査部長 佐藤光之助技官)



大島における1951年の噴火に伴う重力の変化 (飯田・早川による1950・12~1951・4)