

第 5 章

5

高温岩体探查技術



我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 鈴木 浩一
 我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 楠 建一郎
 我孫子研究所 地圏環境部OB 藤光 康宏

5 - 1 はじめに 39
 5 - 2 地震探査反射法 39
 5 - 3 CSAMT 法 40
 5 - 4 総合評価 42
 コラム5：空中から地下を探る 44



鈴木 浩一（1984年入所）
 雄勝実験場では、物理探査法による実験場周辺の地熱源調査法の開発や、複数の物理探査・検層データを組み合わせて透水性や力学強度など地盤物性値を評価する研究を実施してきた。現在は、この研究成果をベースに、産業廃棄物地層処分場となる埋立て地盤や深部地下空洞周辺岩盤の物理特性分布の調査法を実用化する研究に取り組んでいる。



楠 建一郎（1977年入所）
 HDR研究の中で、各種物理探査法の開発研究を実施してきた。特にCSAMT法は国産初のシステムを開発し、全国で活用されるに至った。現在は、この研究で得た貴重なノウハウを基に、地中送配電建設に関連して、推進工法での掘削位置の測量や既設管路の位置を判定できる電磁波式管路位置測量装置の実用化研究に従事している。



藤光 康宏（1989年入所、1994年退職）
 電中研在職中は、通常の業務では物理探査による地下可視化に関わった。高温岩体発電プロジェクトは雄勝実験場における実験から参加し、貯留層評価、CSAMT法による地下構造探査、光ファイバ温度計による温度検層、コスト試算、流電・自然電位計測に関わった。

5 - 1 はじめに

地表から高温岩体の分布を探查する場合、まず、高温岩体の対象である花崗岩（基盤岩）の分布を探查することが重要である。地下に伏在する花崗岩は、上載する地層（火山岩や堆積岩）に比べ、一般に岩盤の密度、弾性波速度、電気比抵抗が大きい。雄勝地点では、花崗岩

（白亜紀花崗閃緑岩）とそれを覆う新第三紀火山岩類の上記物性値に明瞭な差があると考え、地震探查反射法、重力探查法、CSAMT 法等を適用し、実験場周辺の大局的な基盤構造および断層のおおよその位置を把握した。ここでは地震探查反射法と CSAMT 法について紹介する⁽¹⁾。

5 - 2 地震探查反射法

(1) 探查原理

地震探查反射法とは地層の境界から反射してくる弾性波を用いるもので、人工地震の波形記録を電子計算機により情報処理し、反射波のみを強調した画像を描きだし、地下の構造を判断するものである。断層調査では特に基盤上面の落差（変位）の有無の推定に有効である。

(2) 方法

実験場の位置する林道沿いに測線を約 3.5km 設置し、発振点 20 m、受振点 10 m 間隔で測定を行った。震源には起震車（パイプロサイズ）2 台を使用した。

(3) 結果

図 5-2-1 にマイグレーション処理（反射面を空間的に正しい位置に戻す処理）および深度変換（速度分布から反射面を正確な深度に変換する処理）を行った解析断面を示す。これより、比較的連続性の良い反射面は実験場周辺では標高 300 ~ 400 m 付近（反射面：B）に見られる。また、OGC-0（計測井）より西側の区間には標高 -200 ~ -300 m（反射面：A）に認められる。さらに、その上部には標高 300m 付近に反射面 C が認められる。図 5-2-2 に反射法結果より推定した地質断面図を示す。図中の太い実線は比較的連続性の良い反射面、点線は連続性は良くないがその延長と推定される反射面を示す。ま

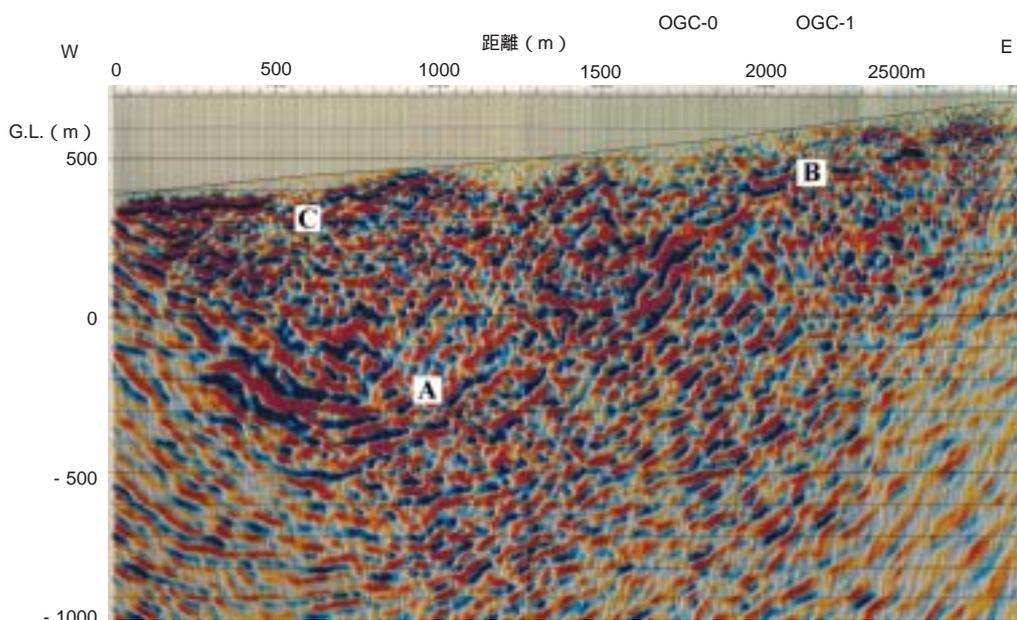


図5-2-1 地震探查反射法解析結果（マイグレーション・深度変換処理後）

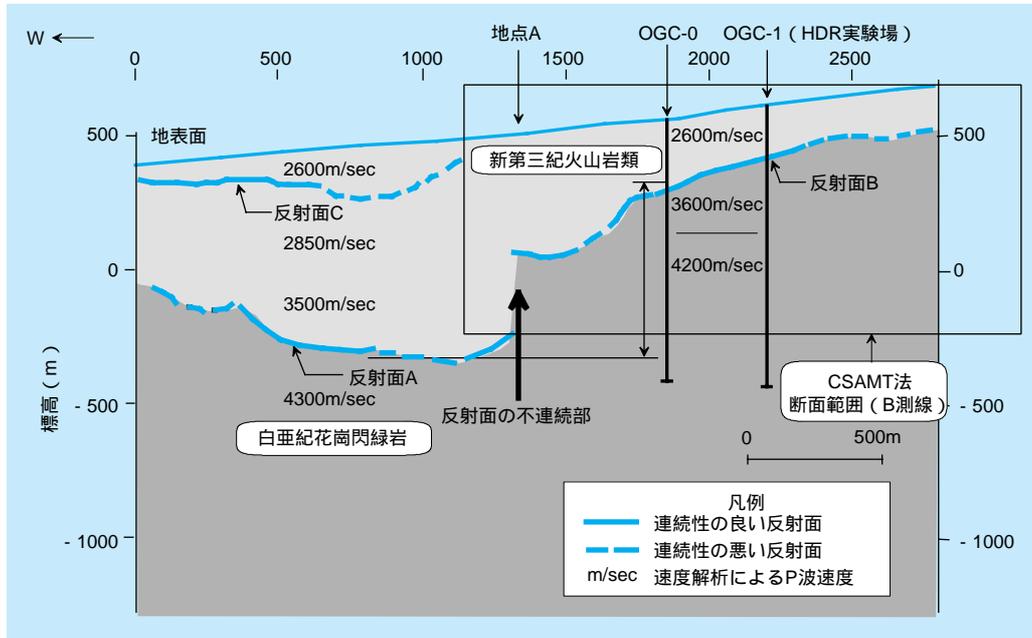


図5-2-2 地震探査反射法より推定される地質構造

た、速度解析(地層の区間速度を求める処理)による弾性波(P波)速度値を表示した。

(4) 考 察

OGC-1およびその西側約300mにあるOGC-0で確認された白亜紀花崗閃緑岩の上面は標高約300m(深度300m)であることが確認されている。一方、OGC-0よりさらに約2km西側にある坑井では標高約-1200m(深度1500m)まで掘削されたが、花崗閃緑岩は確認されていない⁽²⁾。

図5-2-1に見られた比較的連続性の良い反射面(A、B)は、白亜紀花崗閃緑岩(基盤岩)とそれを覆う新第三紀火山岩類との地質境界をとらえたものと推定できる。実

験場より西側約500mまではこの境界面は標高400mから300mと徐々に深くなり、実験場より西側約800mの位置(地点A)では標高100mとなる。この地点Aを境にさらに西側の基盤岩深度は最深部で標高-300mとなっている。地点Aにおいて反射面は不連続でその段差は約400mあり断層が存在している可能性が高い。さらに、反射面Cは第四紀火山岩類と新第三紀火山岩類との境界をとらえたものと推定される。

(5) ま と め

地震探査反射法より新第三紀火山岩類と白亜紀花崗閃緑岩類との地質境界を反射面としてとらえることができ、実験場の西側に断層の存在および基盤岩の落差が推定できた。

5 - 3 CSAMT 法

(1) 探 査 原 理

CSAMT法(Controlled Source Audio frequency Magneto-telluric Method)はMT法(地磁気地電流法)の一種で、人工の電磁波(1Hz~数kHz)により地下に誘導された地電流および地磁気を観測して比抵抗分布を調べる方法で、比抵抗値を介して地下構造を判別するも

のである。比抵抗値の異なる岩石の境界、基盤面の深度、形状などの探査に有効である。

Archie(1942)⁽³⁾は岩石の比抵抗と岩盤物性値との関係を以下の実験式で示している。

$$R = \alpha^{-m} S^{-n} W \quad (1a)$$

$$F = R / W = \alpha^{-m} \quad (1b)$$

ここに、 R は岩石の比抵抗、 W は地下水の比抵抗、 S は間隙率、 α 、 m 、 n は岩種による定数、 F は地層比抵抗係数である。

岩石の比抵抗は間隙率と飽和度が大きいほど低下する。また、地下水の比抵抗が低いほど低下する。地下水面以下の水に飽和した岩盤においては地層比抵抗係数が大きいほど比抵抗は大きくなる。火山岩や若い年代の堆積岩は間隙率が大きく比抵抗は小さいが、火成岩や古い年代の堆積岩などは間隙率が小さく比抵抗が大きくなる傾向を示す。また、堆積岩でも礫質分が多いほど高比抵抗になり、粘土分が多いほど低比抵抗となる⁽⁴⁾。

岩石比抵抗の温度依存性については以下の実験式が提案されている⁽⁵⁾。

$$T + 273 = \frac{C}{\log(R_{20} / R)} - B \quad (2)$$

ここに、 T は地下水温度(°C)、 R_{20} は20°Cにおける比抵抗、 B 、 C は岩種による定数(水は $B = -2.16$ 、 $C = 608$ 、安山岩では $B = -3.08$ 、 $C = 870$)である。

ちなみに、比抵抗が100 Ωmの安山岩が20°Cから120°C、220°Cに上昇した環境下では、比抵抗はそれぞれ13.5 Ωm、4.8 Ωmに低下する。すなわち、地温が200°Cを超える地熱地帯での岩盤の比抵抗は20°Cの環境より1/20以下まで低下する。一般的に地熱地帯において岩盤の比抵抗が極めて低く観測される要因として、①

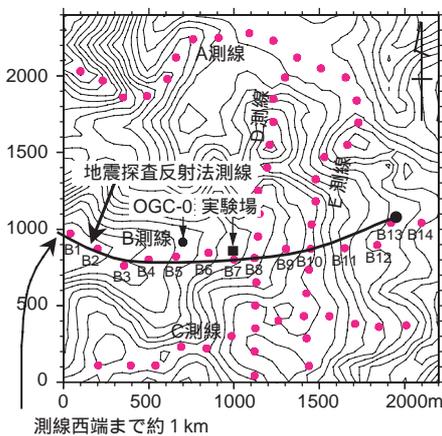
地温が高い、②熱水貯留層となる岩盤の間隙率が大きい、③地下水比抵抗が低いことが考えられる。

(2) 方法

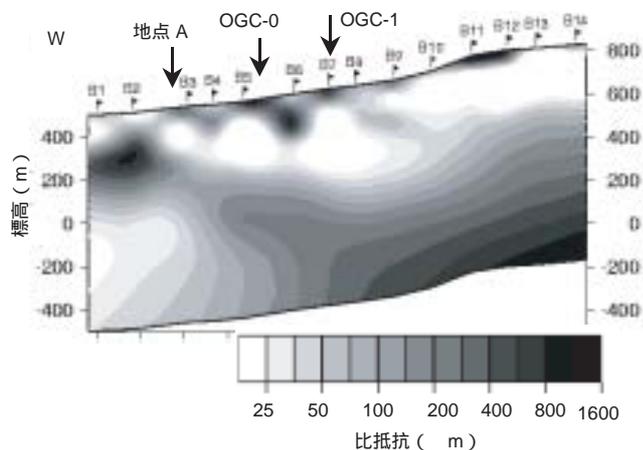
測点は実験場を中心とした2km × 2kmの範囲に約150m間隔で63点を東西方向に3測線、南北方向に2測線配置した(図5-3-1(a))。電流送信源は調査地域より南方約7kmの道沿いに東西方向に2km設置した。送信周波数は8700Hz ~ 2.1Hz間の13周波数である。受信には当所で開発した測定装置⁽⁶⁾を使用した。また、各5測線において2次元解析⁽⁷⁾を行い比抵抗の深度断面図を求めた。

(3) 結果

図5-3-1(b)に地震探査反射法の測線と一部重なる東西方向のB測線での解析断面を示す。大局的な傾向として測点B3より東側では、地表より深度100m前後までが高比抵抗層、その下部の深度300 ~ 400mまでは低比抵抗層、さらにその下に高比抵抗層が広がっている。一方、測点B1、B2では深度200 ~ 300mを中心に高比抵抗部が認められ、その下部は低比抵抗部となっている。よって、測点B3付近に比抵抗構造の境界が認められる。図5-3-2に各測線の2次元解析による比抵抗断面から3次元比抵抗構造を内挿し、標高100mごとに表示した比抵抗水平断面図を示す(実験場の標高は約600m)。標高500 ~ 300mの比抵抗水平断面は高比抵抗と低比抵抗が複雑に分布しているが、標高200m ~ 0mの水平断面図においては探査領域の南西側は低比抵抗部、北東側は高



(a) 測点位置図



(b) 比抵抗断面図(B測線)

図5-3-1 CSAMT法の測点位置図および比抵抗断面図

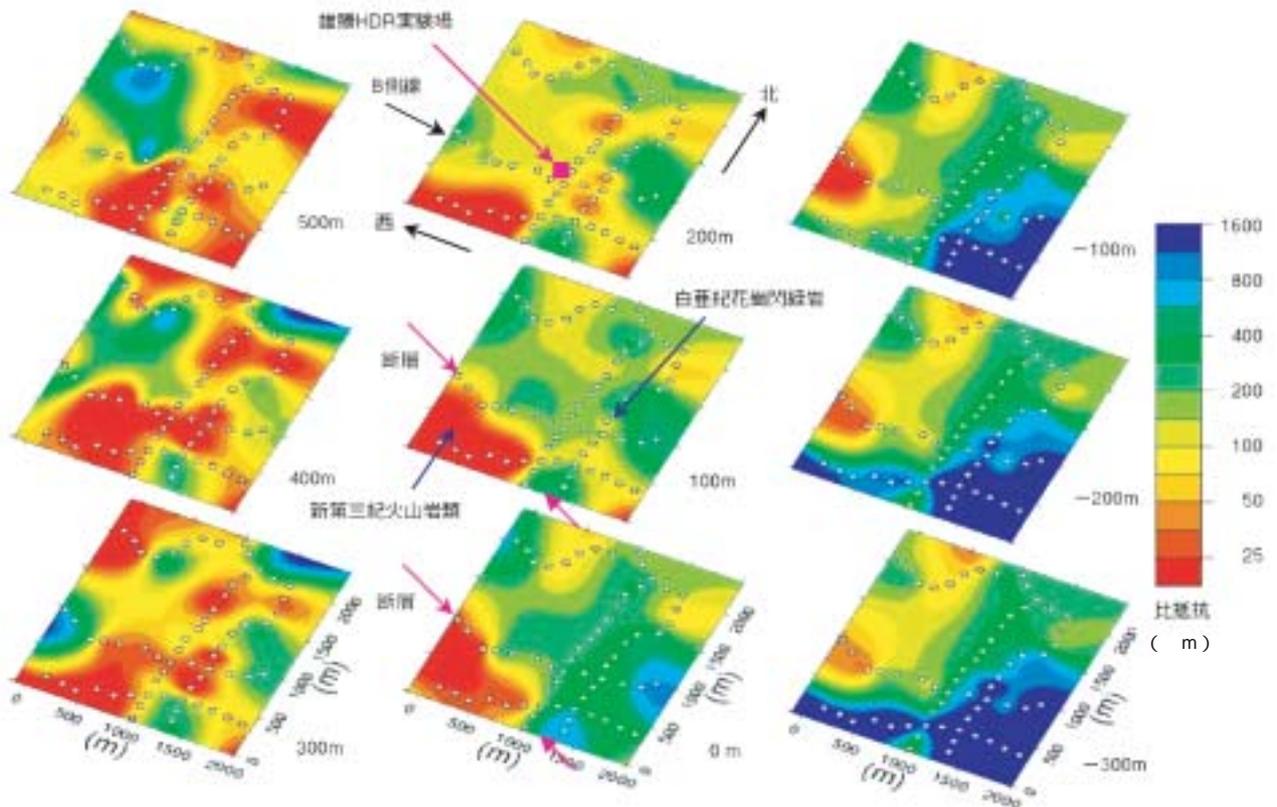


図5-3-2 CSAMT法による雄勝地点の比抵抗構造
比抵抗水平断面（標高 - 300 ~ 500m）

比抵抗部となっている。

(4) 考 察

B測線での比抵抗断面を反射断面（図5-2-1）と比較すると、反射面Bの上下に低比抵抗層（10 ~ 100 m）と高比抵抗層（100 ~ 1,000 m）が位置しており、それぞれ新第三紀火山岩類、白亜紀花崗閃緑岩に対応するものと考えられる。さらに地表下100 m前後までに見られる高比抵抗層は第四紀火山岩類に相当するものと推定され、西側の方が深くなる傾向が見られる。

測点B3より西側では花崗閃緑岩と推定される高比抵抗層は急激に深くなっており地震探査反射法結果で認め

られた反射面の不連続部（地点A）とほぼ調和的である。また、標高200m ~ 0mの比抵抗水平断面（図5-3-2）より、実験場南西方向の約500m先には新第三紀火山岩類に相当すると考えられる低比抵抗部が標高0m付近まで分布しており、花崗閃緑岩に対応する高比抵抗層との境界が北西-南東方向に存在するよう見える。測点B3付近を通ると推定された断層は北西-南東方向に伸びている可能性が考えられる。

標高500 ~ 300mの比抵抗水平断面において、高比抵抗部は第四紀火山岩類が厚く堆積している領域を示していると推定される。

5 - 4 総 合 評 価

CSAMT法結果（図5-3-1(b)、図5-3-2）より新第三紀火山岩類は10 ~ 100 m、白亜紀花崗閃緑岩（基盤岩）は100 ~ 1,000 mの範囲を示すものと考えられる。ま

た、OGC-1での電気検層結果でも両地層の境界深度で比抵抗値に明瞭な差が認められる⁽⁸⁾。両地層を区分する比抵抗値の境界を100 mと仮定して、比抵抗水平断面結

果に地震探査反射法結果を加味して推定した実験場周辺の基盤岩の深度分布を図5-4-1に示す。実験場の南西側

に基盤面深度が落ち込んでいる構造が認められ、北西-南東方向の断層が存在する可能性を示している。

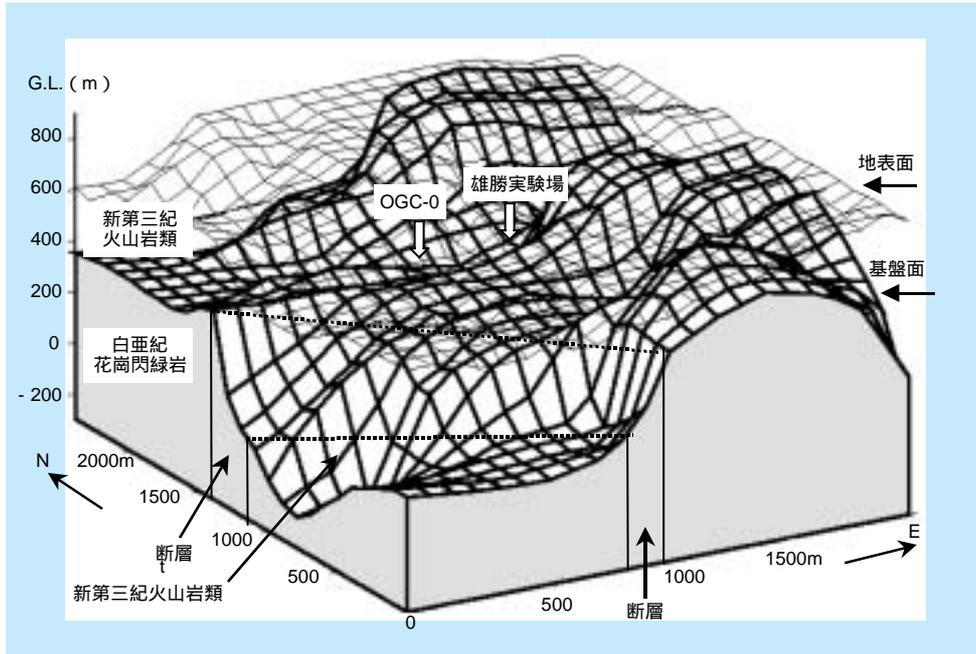


図5-4-1 CSAMT法および地震探査反射法より推定される雄勝地点の地下構造（鳥瞰図）

コラム5：空中から地下を探る

当所では第5章で述べた地表から地下深部の構造を把握するための各種物理探査法の研究を高温岩体発電等のテーマの中で進めてきた。当所による開発研究の成果は、地熱・高温岩体地域のみならず、電力各社の水力、原子力地点などでの地質調査法の一環として定着しており、電力以外の土木建設予定現場でも利用されつつある。

一方、物理探査法による適用性が認識されるに従って、利用者側からの物理探査法に対する期待も大きくなってきており、より広範囲をより迅速にしかもより安くといった要求が出てきている。また地表での物理探査法に関しては2次元探査法が一般的になっており、最近では3次元探査の研究が盛んに実施されている。その際にも、3次元のための測定データをいかに効率良く取得するかが大きな課題となっており、この点においても空中探査に期待が掛けられている。ここでは、以下に現状での空中探査についての概要を述べる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

空中探査の種類

(1) リモートセンシング

地球表面における、電磁波の反射、散乱、幅射などの物理現象を利用する探査法で光とマイクロ波を用いる方法がある。適用限界は、地表面に限られることや、光を用いる方法では雲、雪などの気象条件に左右されること、地上調査（周辺の環境、気象データ等）との対照が必要となることなどがある。利用範囲は、土地利用分類・地質構造等の調査、環境・自然現象のモニタリングなどがある。適用分野は地熱を対象とした場合には地表面の熱分布の把握である。その他の適用分野には地球物理、環境（地質構造、植生）、防災（地すべり、地震）などがある。

(2) 空中放射能探査

ウラン鉱床の探査では広い地域を対象とする初期の段階において使われ、対象地域の上空を一定間隔の測線に沿って飛行し地表からの放射線（ガンマ線）を測定する。

測定値は対地高度の変動等を補正し、ウラン/トリウム比、ウラン/カリウム比などの分布図として表示される。適用限界は、被覆層の厚さに影響されること、地上用に比べて大きな放射線計測カウンタを必要とすること、標準線源による補正を頻繁に行う必要があること等がある。適用分野として地熱、活断層調査などがある。

(3) 空中磁気探査

地球磁場を測定する磁力計には、ベクトル量である磁場の三成分（東西、南北、上下）を測定するフラックスゲート磁力計や磁場の強さのみを測定するプロトン磁力計などがある。このうち、プロトン磁力計はセンサーが多少の姿勢変動を被っても安定して測定が可能のためよく用いられている。

一般に地上での磁場測定では地表付近の人工構造物などによる影響を強くうけるため、航空機などを用いた空中測定が有利である。また、航空機を用いることから広範囲の迅速な調査が可能となるため、資源探査においては概査の手段としてよく用いられる。地熱、火山地域では広域における溶岩の分布を把握することに利用される。また、岩石のもつ磁性がなくなる深度（キュリー等温面深度といい、地温が約500～600の深度）の探査から地下深部の温度分布を調べる試みもなされている。

(4) 空中電磁探査

空中電磁法は航空機に電磁探査装置を搭載して探査を行う方法の総称である。

これまでカナダやオーストラリアなどの国々で、主に金属鉱床や石油・天然ガスなどの資源調査開発のために行われてきた。しかしながら、国外で実用化されているいずれの探査も、地下への探査可能深度（可探深度）は浅く、深部の地質構造は地表の探査結果から推定しているのが実情である。

特に、詳細なデータを取得することが可能なヘリコプターを用いた空中電磁法は、地下の可探深度が50～100m程度と浅く、最も深いところまで探査できる大型の飛行機を用いたシステムでも、可探深度が地下200m程度である。この大型航空機による空中探査は、国内では地形の起伏が激しく、また、電波法や航空法などさまざまな法律の制約から、探査実施は不可能である。

当所では、可探深度が地下300mから1kmを目標とするヘリコプターを用いた画期的な空中電磁法を考案した（**図-1**、**写真1**、**2**参照）⁽⁵⁾。この方法は、地表に電磁波の発信源を設置する空中電磁探査システムであり、これまで北海道大学、京都大学、九州大学等の協力を得て、阿蘇火山山麓において基礎実験をおこない、原理的な開発可能性を確認している。本方法が実用化された場合の、主な利用分野として、地熱探査、特にオーストラリア大陸のような広大な地域における高温岩体の探査の他、火山調査、地滑り、土木関係の岩盤調査等が期待できる。

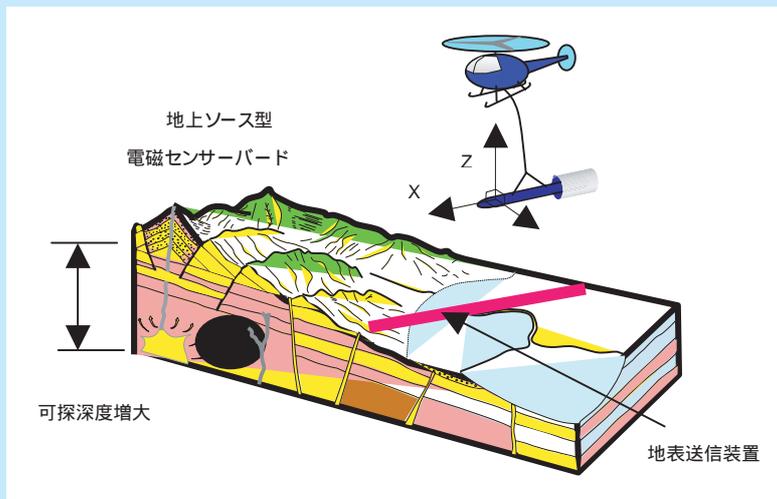


図1 空中電磁法概念図



写真1 空中電磁法実験風景



写真2 空中電磁法センサーボード