

電 気 検 層 の 沿 革

武 居 由 之

(1) 物 理 検 層

物理探査法とは 地表においていろいろな物理現象を観測して 地下の状態を推測する方法であるから 調査法としては間接的な方法である。 それにひきかえ試錐探査法は 地下の物質をとり出して調べる方法であるから 直接的で最も確実性ある手段と考えられている。 しかし試錐による方法は非常に経費がかかるものであることと 試錐によって採取できる資料(コア)は必ずしも完全ではない。 たとえばコア採集率の低い場合がある。 水 ガスが対象の場合にはコアチューブによって採集することができない。 対象とする鉱物が掘さく泥水のため洗い流されて 採集したコア中に失われている場合がある。 地下地質調査の完璧を期するためには試錐の際に試錐孔内で物理探査 地化学探査を行なっていくことは当然望ましい。

坑井内でいろいろの物理量を測定して岩石 地層の状態 性質を調べることを物理検層 (Geophysical logging) と称する。 しかもその調べ方は深度に対応して連続的に測定するものである。 しかしこの場合も 直ちに岩石 地層のみが調べうるのではなく 試錐孔の孔壁の状態といっしょに調べているのである。

(2) 物 理 検 層 の 種 類

地上の物理探査で用いられている各種の方法は 大い物理検層へも用いられている。 電気検層 (Electric logging) 電磁検層 (Induction logging) 放射能検層 (Radioactive logging) 音波または速度検層 (Acoustic or Velocity logging) 温度検層 (Temperature logging) 磁気検層 (Magnetic logging) などが主要なもので これらの他にいろいろな検層法が考察され 実用化されている。 物理検層法のことを一名「産業地球物理学」とも称しているのは 広汎な実用性があることのあらわれであろう。 なかでも電気検層法は最も普及し よく研究されてきた方法である。

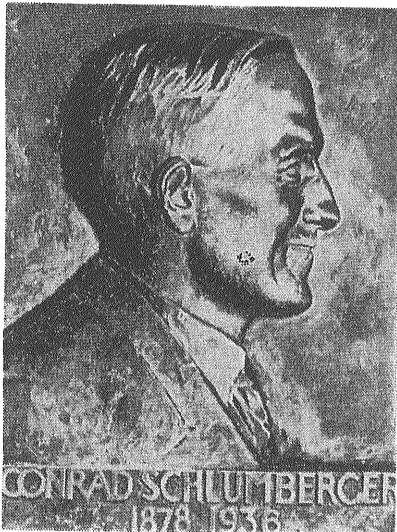
(3) 電 気 検 層 の あ け ぼ の

電気検層の創生は フランス人シュランベルジャー (Schlumberger) 兄弟がペシュロン油田で実験的に行なった1927年9月5日であった。 もっとも物理検層としては 今からちょうど1世紀前1869年にイギリスの著名な物理学者ケルビン卿 (ウィリアム トムソン) が井戸の坑内温度を測った記録が残っている。

シュランベルジャー兄弟とは元パリ国立鉱山学校物理学教授であった 兄コンラッド (1878~1936) と機械技師の弟マルセル (1884~1953) で 彼らは当時地上電気

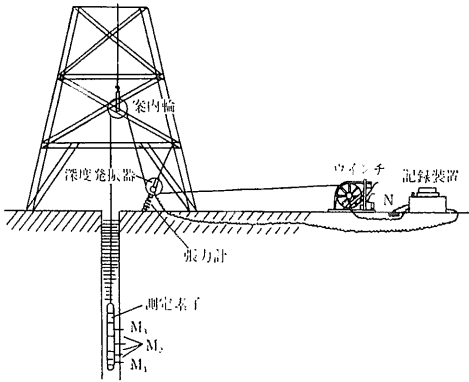
第1図

兄
コンラッド
シュランベルジャー
(1878-1936)



弟
マルセル
シュランベルジャー
(1884-1953)





第2図 電気検層作業概略図

探査の専門会社 Société de Prospection Electrique を営んでいたが ある日友人と試錐の問題について話し合っていたとき 電気探査を試錐孔井に試みることを考えつきすぐ実行に移した。最初の測定は電気探査でもって比抵抗4極法配置をとり 1 m毎に点測定した。そして測定結果をたて軸に深度をとったグラフに描き 初めての電気検層図を作成した。今日でも簡単な電気検層を電気探鉱機で行なっている場合にお目にかかるが最初のアイデアは実に卓抜したものであった。

翌1928年にシュランベルジャー兄弟は「電気コアリング」と称して正式に営業種目に加えた。早速フランス国内で使用されたが ベネズエラ アメリカ ソ連で続々と使われだし 蘭印(インドネシア)でも1930年には使われはじめた。兄弟は実用化に際して機械の改良を積極的に進め 初回の点測定は 深度に応じた連続検層方式にした。自然電位が坑井に生じていることに気付いていたので SP(自然電位)と比抵抗を同時に記録させた。当初の電極配列は今日でいうラテラル配置であった。炭層の検層に適用しているとき配置の仕方によって求める炭層の深さに食い違いが生じたことを発見しノルマル配置に改めた。

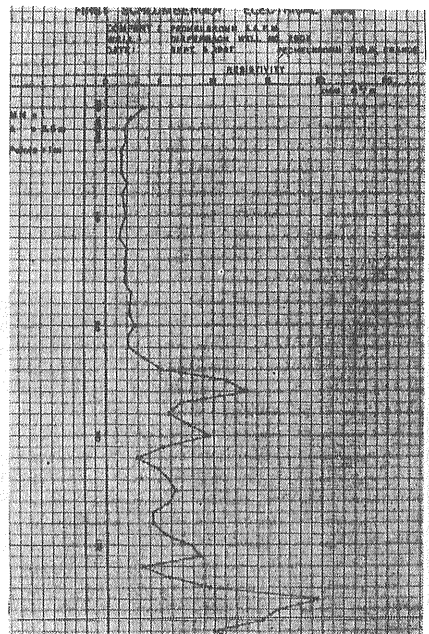
電気検層の基本的な操作は初期4年間で早くも出来上ったとみてよい。以後世界の石油産業とくに米国の石油産業で著しく重宝されたが いろいろな問題も起こってきた。

(4) 電気検層

電気検層法の原理は地表で行なう電気探査法と同じである。異なるところは地表探査では 地表面以上には電流は達しない すなわち空間の1/2は媒質に含まれないが 電気検層ではすべての空間が媒質となる。周知のウェンナー氏法の公式は地上探査の場合 $\rho = 2\pi aR$ であ

るが 電気検層の場合 $\rho = 4\pi aR$ となる。それ故 電気探査の理論はほとんどそのまま電気検層の理論へ拡張できる。そして電気検層は試錐孔の内部を掘さくし泥水をよく循環したのち行なわれるから 境界の測定条件は地表探査に比較すれば一定といえる さく手地質柱状図からすでに何らかの地質学的情報をえているから信頼性の検討も容易である。

電気検層図の描き方は たて軸に深さをとり中央は地質柱状図または深度を記し 右側には比抵抗曲線を算術目盛で描く(最近では解析に便利なよう対数目盛で示したのもも登場している) 左側には自然電位曲線を描く。自然電位は絶対値を基準にとる必要なく 左へ向かって電位が負になる相対的な目盛に示しておく。坑井の位置 さく井の仕様 掘さく泥水の性質 温度 電導度 測定的方式 範囲などの要目は表紙につづく頭書の欄に記入しておく。このような検層図表示のしかたは便利で 地層の検討 対比に使いよく 物理検層 化学検層 坑井内測定などはほとんどこの形式になっている。今日電気検層法の用途対象は著しく広がり 石油だけでなく 金属鉱床 非金属鉱床 石炭 天然ガス 地下水 温泉 土地地質調査などあらゆる分野に使われているがごく簡単な検層ですまされる場合も多いのは 検層作業というものはさく井作業を前提としているから検層に要する費用 検層装置の償却費が さく井費 さく井機の償却費を超えがたいという制約が存在するためであろう。



第3図 シュランベルジャー兄弟最初の電気検層図

(5) 本邦への導入

シュランベルジャー兄弟による電気検層法の発明は日本でも注目され 地質調査所の植村技師が地層対比に有効なことを紹介していたが 1935年(昭和10年)シュランベルジャー商会在日本政府へ特許を申請し 認可されると 翌1936年 日本石油 日本鉱業 北樺太石油の3社が共同で装置を輸入し クロード氏の指導で使用を開始した。これはのち1941年設立された帝国石油に継承された。

(6) 戦前期の電気検層

初期の記録装置は 電位差計と手描レコーダーを結びつけた方式のものであったから 記録者が機械の傍に立って深度に応じてふれる計器の針を追いつつながら記録を描かねばならなかった。1936年には光学的な記録方法に改められ精度 測定速度ともに進んだ。地層の傾斜を測るテレクリノメーター 坑内測温器は同年日本に輸入された。ノルマル配置の比抵抗検層を長短2つの間隔で同時に測定する方法も考案され 坑壁試料をとり出すサイドウォールサンプラー 地層の崩壊を調べるカリバロログなど技術的な進歩は 大戦前に続々とシュランベルジャー商会や米系の会社により発明された。放射能検層 化学検層が創始されたのは1939年である。このように技術的な研究開発はよく行なわれていたが 理論的研究 定量的な解析が発表されたのはやや遅く1938年 電気検層と産油量の関係が求められた程度であって 第2次大戦突入のため この方面の発展は大きく遅れた。しかし大戦中米国のアーチが地層比抵抗係数と滲透率

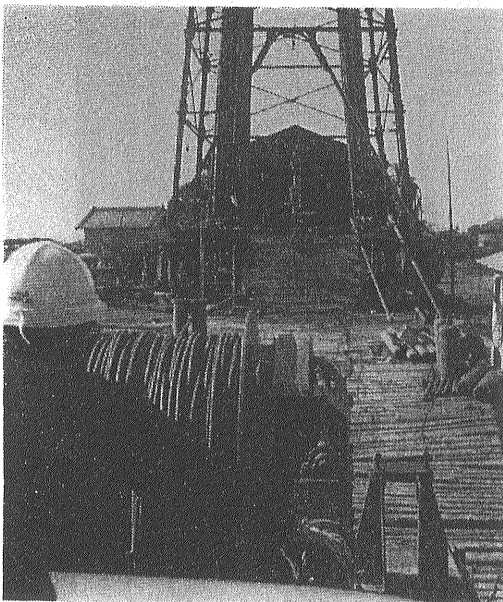
孔隙率との関係を経験的に見出したことなどから(1942)戦後になって理論 技術両面で著しい進歩を示した。20年間にわたる世界各油田での検層成果の蓄積 含油層に擬した実験の検討 理論的研究 新しく開発された放射能 音波 電磁の技術の導入等が進歩を促したのであるが 電気検層法が含油層評価の中心技術と認められるに至ったのである。油層の評価とは地層の孔隙率と水飽和率を算出し 層全体の含油含ガス量を推定することである。

(7) 地質調査所での電気検層

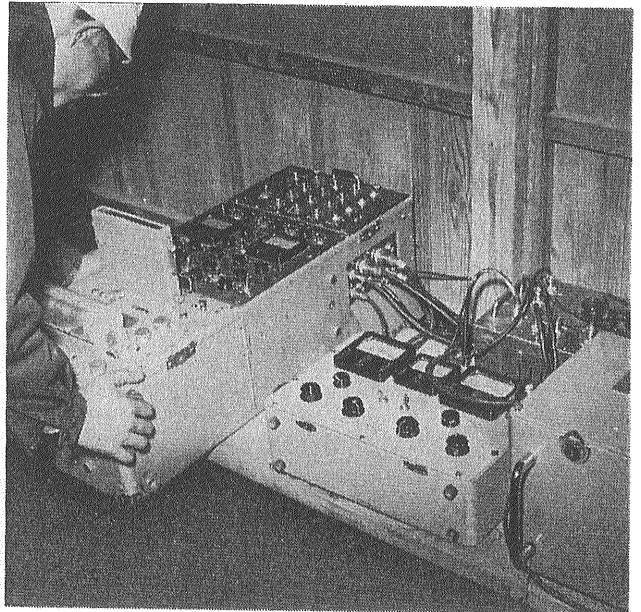
地質調査所では戦後電気検層法の実用化をはかり 加来技官が1948年をはじめて秋田県相内鉱山の試錐孔に適用した。以来 天然ガス ウラン鉱床 温泉 地熱 工業用水を対象に毎年行なってきた。現在4素子型電気検層機2式 2素子型2式 1素子型2式 計6式を保有し 2,500m車載式検層車1台と 1,000m級捲揚器2基を有する。当所で掘さくした試錐孔の検層 当所がさく井業者に発注した試錐の検層を担当し 外部からの要請にも応ずる。物理探査部技術開発課第4研究室は検層技術の研究を主要課題としている。地熱坑井のような高温井の電気検層 温度検層には独特の資材を使用して成功を収め 最近ではマイクロカリバロログ デイプメーターサーベイの適用と改良に努めている。

(8) 戦後の電気検層の進歩

大戦後の電気検層の進歩は目ざましく とくに質的な進歩が大きい。従来の電気検層は単に検層を行なって



第4図 深さ2,000m級の天然ガス坑井の電気検層にはウィッチをのせた検層専用車を使用する



第5図 4素子型電気検層記録装置 掘さく坑井ぎわの暖室内に装置記録をとる

特徴ある地層を曲線から判定するに過ぎなかったが 岩石物理学の研究が進み 掘さく時の地層の状態 比抵抗値 自然電位の物理的意味が次第に明らかになってきた。そのため初期には 自然電位曲線は孔隙率を指示するものと考えられ 孔隙率図と称していたものが修正され 自然電位は電気化学的電位と動電気学的電位から構成され 泥水掘さくの場合実際には大部分電気化学的電位が生じ その偏差量の大きさは 地層水と泥水ろ過水のイオン活量の比の函数となること。砂質頁岩では砂岩の場合より偏差量が減退することが明らかにされた。地層の比抵抗では比抵抗曲線に現われた値が見かけの値であって 真の値を得るためには2つの間隔で測った値から理論的に解析して求める図解法が発表され 定量解析手法が本格化した。これは偏差曲線図表と呼ばれている(1947)。一方電気検層でみかけの比抵抗値しか得られないのは 試錐孔中を充滿している掘さく泥水の影響のためであり 油基泥水を使って掘さくしている場合には電気検層が不可能となる。この場合に対応できる方法がインダクション検層(電磁検層)で 1947年に發明された。電極内には5~6組の発信コイルと受信コイルが巧みに組合わせられ 坑壁より適当な距離にある部分の真値に近い比抵抗値を測ることができる。今日では石油を対象とした場合 大部分の油井の電気検層は電磁検層 または電磁検層とその他の検層法との併用に置き換えられている。しかし 機構が複雑であり 發明考の權益に属する部分が多いため わが国では未だ国産化に至っていない。これと反対に坑井水 地層の比抵抗が低く 薄層の場合のためにラテロ検層またはガード検層が1950年に發明されている。

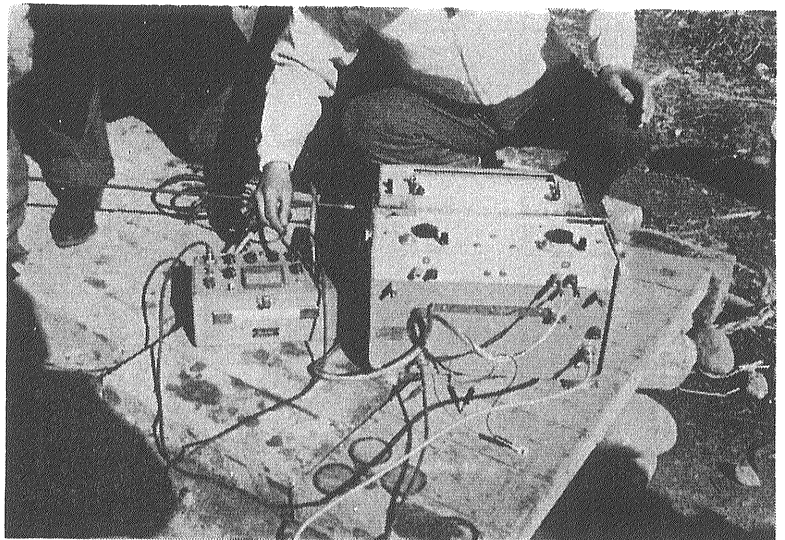
1948年に發明されたマイクロ検層は電極間隔を2インチおよび1½インチと非常に短くして微細な構造を探るものであるが 実は当時次第に解明されてきた透水性地層の掘さく中の状況 すなわち掘さく泥水による泥壁の生成 ろ過泥水の浸入 混入を調べて石油 ガスの飽和率を求めようとするものであった。これらの發明にはいずれもシュランベルジャー社が先鞭をつけたのである。シュランベルジャー社は創始以来常に豊富な経験と高度の技術を維持し 米国石油検層市場の80%を確保している。現在35種類の検層法を駆使して世界52カ国へ進出している

という。検層会社の経営は坑井測定請負制の形式をとり 手数料 旅費 深度料 測定料 待機料等を請求される。戦前は深度料 測定料あわせて1フィート当り11セントといわれていたが 現在では1フィートあたり1種5~6セント見当とみられる。

米国系の各社も次々と漸新な検層法を開発し パロイド社による泥水検層(掘さく中の循環泥水に微量に含まれる炭化水素を連続的に定量分析する) ハンプル社の音響検層が創案された。放射線を利用した検層法は前述のγ線検層(ウエルサーベイ社) 中性子検層(同社) γ-γ密度検層(レインウエルズ社) 塩分検層(マクルー社) 核磁気検層(カリフォルニア研究所) 中性子寿命検層など新技術が続出した(地質ニュース151号155号に放射能検層について詳説されている)。これらは含油層の孔隙率 飽和率の評価に役立つ値を与えるものである。

電気検層の効用の一つは地層の対比に使えることである。狭い範囲では十分に信頼ができ もし3本の検層井の対比を行なえば地層の走向と傾斜がきめられる。しかしディップメーターが考案されてからは(1941) 1本の坑井でも地層の走向傾斜を知ることができるようになった。当初のSP型 dipmeter から比抵抗型 dipmeterへ カメラ内蔵のホトクリノメーターから電位差計式のポテクリノメーターへ改良され 1坑井で数十点の走向傾斜を測った非連続式傾斜測定は 連続式傾斜測定に移った。

最近ではデータ解析を電子計算機で1mごとに行なう高密度傾斜解析が使われている。この結果地層の走向



第6図 2 索子型電気検層機 (九州出張所)

傾斜だけでなく構造の解釈 堆積状況の推定までできるに至った。電子計算機の導入は 検層解析にも行なわれ 長尺の検層記録をすべてデジタル磁気テープにとりじんそくな解析を行なう方法が1966年よりシユ社では採られている。

(9) 戦後日本の電気検層

前述のように戦前わが国には採油3社に独占的に使用され 物理探鉱のために使われた報告はなかったが 藤田義象博士の著「探鉱学」には 電気探鉱法の一つとして紹介されていた。戦後復興とともに物理探査活動が年を追って活発となったが そのなかで電気検層を物理探査者の手で試みる事が多くなった。とくに地下水開発 探炭試錐 温泉開発に関連した調査によく使用された。一方採油関係者は戦時の技術の遅れを取り戻すべく 国産の検層装置の製作(1949) 電線の強化 測定速度 精度の向上に努めたが 1954年に帝国石油が米国から放射能検層機 翌年FM式電気検層機を輸入して石油開発に投入した。1956年にはシュランベルジャー社が石油資源開発株式会社と契約を結び 山形県酒田と新潟県長岡で検層請負作業を実施するに至った。

地質調査所発行の物理探鉱調査研究一覧によると 近年本邦物理探査活動のうち物理検層によるものは 年間6~8%を占める。件数は40件内外で増加の傾向にある。ただしこの統計資料は報告件数を示しているのであって実際の検層坑井数はもっと多い。また物理探査の一方法として行なったものに限っているから 物探技術者でなく さく井担当者 さく井管理者 応用物理技

術者による物理検層件数は含んでいない。物理検層中 電気検層によるもの および電気-放射能検層併用 電気-温度検層併用によるものが8割を占め 残余は放射能検層である。速度検層 音響検層 磁気検層は少数しか報告されていない。

実施している機関については 戦前の石油3社→帝国石油→石油資源開発→石油開発公団事業本部で一貫して継続している。地質調査所 電気試験所は戦後もなく試験を開始し 農林省農業土木試験所 北海道庁地下資源調査所などの官庁試験所 金属鉱山会社 石炭鉱業会社 各大学の物探研究室 探査コンサルタント会社の順に拡大し約40機関が実施態勢にある。さく井会社で検層機を具備しているものも多数あるとみられる。

(10) 電気検層の用途

電気検層の対象は まず石油 天然ガス ついで地下水 温泉 地熱 石炭 金属鉱床 ウラン鉱床 土木地質調査などである。

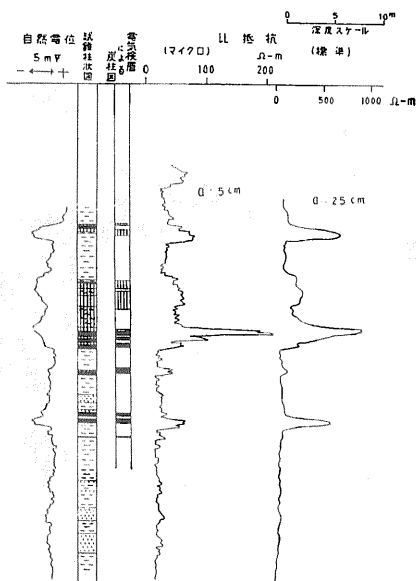
石油に対して使う場合の目的は3つある

第1は地層の対比を行なうことである。油田地域内で掘さくされた試掘井の検層結果を隣接の坑井検層結果と対比して 地下構造図 等層厚線図 断層線図作成の資料とする。

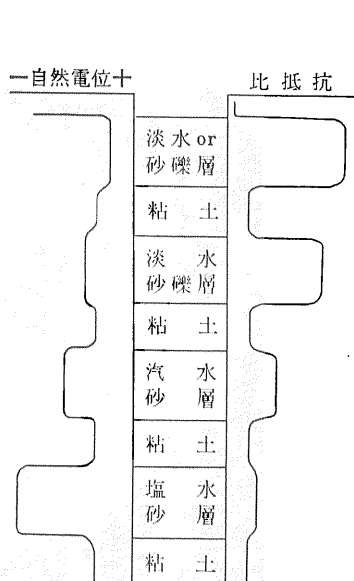
第2は含油層の孔隙率と飽和率を算出することである。孔隙率 ϕ は $\phi = m \sqrt{\frac{R_w}{R_o}}$ 飽和率 S_w は $S_w = \sqrt[n]{\frac{R_o}{R_i}}$ の式で求めることができる。ここで R_w R_i R_o は地層水の比抵抗 地層の真の比抵抗 含油層が水で飽和されたときの比抵抗である。 m n はそれぞれの岩相からきまる定数である。

第3は電気検層以外の検層を行なう場合の予備資料をうることである。とくにサイドウォールサンプラードリルシステムテストを行なう深度を決めるには電気検層図を参考にする。電気検層が普及してからはコア採取の必要性が軽減され 掘進能率は急激に向上した。

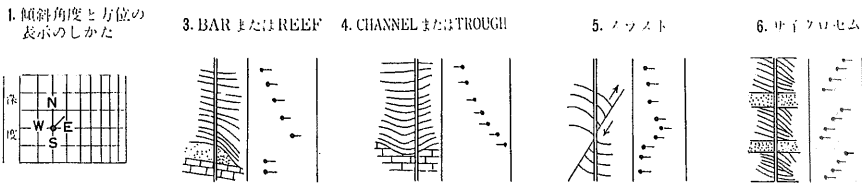
金属鉱山 坑内試錐に電気検層を利用することが有効と認めている。坑内からの探鉱試錐を行なってもコア採取率の低い場合がしばしばあり 不足を補うために電気検層を行な



第7図 炭田の電気検層図(鉱山地質 no. 23から)

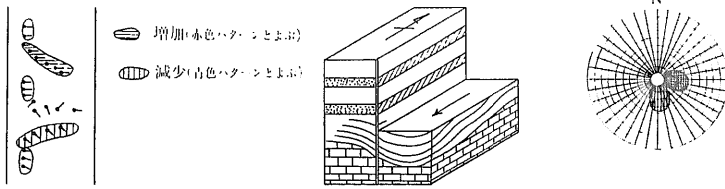


第8図 地下水電気検層の模式図



7. 方位の傾度を平面グラフに投影する流系が推定できる

2. 傾斜模様の分類



第9図 連続傾斜測定 の 解 釈

温泉探査には地下水探査の場合と同様の適用ができるが 裂か帯の存在を検出することが重要となる。温度検層の併用が必須であることはいうまでもないが 掘さく終了後にも くりかえし坑内水比抵抗検層を行なうことが有効な結果を生んでいる。

石炭 に対しては1953年ごろから各社で電気検層を行なうように

う。SP検層で鉱床示徴を顕著に得ることがある。一般に探鉱試錐は傾斜方位が任意でかつ孔径が細い そのため坑内水がなくても測定できるコンタクト型電極が工夫されて使われている。スラッジボーリングの際にも電気検層を行なうと品位のみならず層厚も確認できる。

石炭の探炭試錐では全コア採取が原則であるが 炭層部分の採集率は平均68%で不十分であり 山丈と炭丈を正確につかむため 電気検層を実施する。海中試錐の場合コア回収率はさらに低いため検層はぜひ必要である。石炭の比抵抗値は炭質によって変化するが砂岩頁岩に比べれば著しい差があるから 炭層の検知と対比には十分である。

ウラン鉱床探査にはもちろん放射能検層が主要技術になっているが 電気検層も鉱層の層厚の推定 鉱層の岩相推定のため併用され 堆積型ウラン鉱床が発見されてからますます多用されている。

土 地 質 調 査 における電気検層の適応性は未だ十分に して ないが 世界 各国の土木建築を対象とする物理探査の実績をみると 屈折地震探査に次ぎ第2位を占める。米国では最も多いと報告されている。わが国では地盤強度調査の工事要目に電気検層が加えられることが多くなっている。

地下水探査には電気検層の果たす役割りが非常に大きい。

第1に帯水層の位置を決定すること。比抵抗曲線の比抵抗値の大きさと SP曲線の偏倚から帯水層を認識し 層の厚さを推定する。

(11) あ と が き

電気検層の原理 解析法 装置についての説明を今回は省いたが 巨大な石油産業界を背景にした物理検層の技術は日進月歩で まことに目覚ましいものがある。重力検層法 放射検層法 データ解析法は今後も発展を予想される。物理探査の分野では これらの検層法を早期にいかにか経済的かつ協調的に適用させるかが問題となるのではないだろうか。

第2には帯水層の塩分濃度を推定すること。曲線のふれの大きさから淡水であるか 塩水を混えているかを判断する。定量的に決定する方法はあるが 通常は良好な帯水層の範囲を選ぶにとどまっている。

- 既刊「地質ニュース」中電気検層に関する記事は次のとおり
- No. 7 温泉坑井の調査法 物理・化学検層
- No. 49 検層について
- No. 75 物理検層
- No. 100 春日部層序試錐

(筆者は物理探査部探査課)

第3には産出量の推定である。産出量は揚水試験によらなければ算出できない量であるが 関東地方南部で実測された例では 比抵抗値と透水係数には Cl⁻含有分の増加しない範囲(深さ100m 以内)では正の比例関係が見出されているので あるていど産出量の予測に役立つであろう。

国土調査法第3条に基づく地下水調査作業規程準則(昭和34年10月23日総理府令)では 電気検層に関する条文を1条定めている。