

帯水層評価のための放射能検層の研究

小 鯛 桂 一*

Studies of Nuclear Well Logging for Evaluation of Aquifer

Keiichi KODAI

Abstract

The author reviews the result of studies on quantitative evaluation of aquifer based on the data obtained by the nuclear well logging used in water well.

Firstly, the borehole effects in relation to the various log are specified, i.e., a precise calypter tool which was manufactured by way of experiment, considering from economic view point, is used to obtain the standard values for mathematical inspection of the differences between cased- and uncased-holes related to the log responses affected by the rugged borehole wall.

As the result, though the degree of borehole effect to the density logging is smaller in the cased hole than in the uncased one, the log responses in the former tend to become inaccurate by the effect of high bulk-density layer which is mainly composed of sand and/or gravel, because the log responses are reduced remarkably by the radiation shield related to the thickness and property of both medium of steel casing and gravel packing. In order to make an exception of the above-mentioned defect, the windows of the emission and the detection in the logging probe were reconstructed from diffusion type to beam type, with increasing the intensity of the Cesium-137 source to about one hundred times. As a result of an experiment used this probe, the accuracy is improved getting stable log responses. In addition, in order to study the stability of gravel packing with time passes, the density loggings were applied twice at one year interval in the same hole. As the result it clears that though the bulk density of lower layer does not change, that of upper layer partially increases due to spontaneous consolidation caused.

Next, for the gamma-ray logging the all effects due to the changes of the borehole condition are little but a technique for more precise measuring of the clay content in unconsolidated aquifer is remained as future problem.

On the other hand, in order to calculate effective porosity it is expected that techniques of cross-plot analyses which have been used for reservoir in oil field are applied to unconsolidated aquifer.

Various logging methods of density, gamma-ray, normal resistivity, and spontaneous potential have been very often applied to water well on economic view point. We, however, meet to the difficulties of doing cross-plot analyses because conceptive interrelation among their logs is obscurity. Then, we expand a geometric treatment concerning cross-plotting between density and neutron logs, which was developed by Krug and Cox, 1976, to the range of unconsolidated aquifer, and we get matters as the following; i.e., the quantitative detail of effective porosity and the clay content on circumference of aquifer, and the accuracy of the values which are presumed in a mathematical treatment process. Therefore, some cross-plot among various well loggings of density, gamma-ray, resistivity, and spontaneous potential will be in future able to analyze by combining the variables obtained from cross-plot analyses of both the log responses of density and neutron.

* 環境地質部

要 旨

この報文は水井戸中で行う放射能検層から得られるデータを基に、帯水層の定量的評価を行うための研究成果をとりまとめている。

まず、各種の検層と坑井影響との関係を明らかにする。

すなわち初めに、経済性を考えた高精度の水井戸用キャリパー検層機を試作した。そしてこの検層機を用いて得た坑内壁の径の変動値を基準にして、裸坑とケーシング坑間の検層応答が坑内壁の荒れにより影響される度合を統計的に検討した。その結果、次のことがわかった。ケーシング坑中における密度検層応答は、裸坑中のそれに比べ小さな坑径影響度を示す。しかし、前者は鉄ケーシングとグラベルパッキング、両方の媒体厚に関係する放射線遮へいによる減衰を生じる。したがって、おもに砂や礫で構成される高密度層中で不正確になる傾向を示す。

このような欠陥をとり除くために、これまで使用してきた¹³⁷Cs線源の強度より約100倍大きな線源を用いるとともに、検層プローブの照射窓・入射窓とも拡散型からビーム型に改作した。そしてこのプローブで試験した結果、非常に安定な応答が得られ、精度の向上がみられた。

加えて、グラベルパッキングの経年的安定性を知るため、密度検層を同一井に対し1年余の間隔で2度実施した結果、上部層の容積密度は一部分だけ自然圧密により増大していた。しかし下部層のそれは変化なく安定していた。

次に、ガンマ線検層の応答は坑井状態の変化にあまり影響されないことが判明した。しかし粘土分をより一層正確に測定するための機器的な精度の問題が今後に残されている。

他方、有効間隙率を計算するために、油層工学における固結または半固結の貯留層に用いるクロスプロット解析技術を未固結層である帯水層に適用することが期待される。

密度、ガンマ線、ノルマル比抵抗、そしてSPの各検層法は、経済的観点から水井戸で多く使用されているが、これらによる各検層図間の概念的相互関係があいまいなので、クロスプロット解析を困難にする。そこで、KRUG and Cox (1976) が開発した密度と中性子の検層応答間の図形的処理法を未固結帯水層にまで拡張すると、帯水層周辺の粘土分と有効間隙率の定量化が可能となり、その際の算出過程における仮定値の妥当性が確認

された。したがって、各水井戸検層図間のクロスプロット解析は、まず密度と中性子、両方の検層応答をクロスプロットし、解析することにより得られるところの各変数相互の関係を結合することを糸口とすることにより、将来容易になる見通しを得た。

1. はじめに

わが国の主要な帯水層は臨海平野部や沖・洪積の扇状地に多く分布する未固結の粒状帯水層であり、その他の固結性や裂か性、あるいは有孔質溶岩や空洞からなる帯水層とは透水性その他の物理的性状を異にする。

筆者は、前者の未固結の粒状帯水層の水井戸を対象に、放射能検層を主体にした手法により、帯水層の定量評価を目的とする機器および解析上の問題に関する研究の成果をとりまとめている。

謝辞 本研究は経常研究費により行われたが、このために用いた試験井は東京通商産業局と仙台通商産業局が地下水適性化調査のために掘きくし、その後、水位観測井として使用している水井戸を一時借用したもので、両局の関係各位の御協力を感謝する。

また、使用する密度検層機のプローブの改作は、当地質調査所の竹内三郎技官が終始担当した。

なお、報告書をまとめるに際し、松野久也環境地質部長と黒田和男水資源課長の指導を頂いた他、中条純輔海洋物理探査課長におもに技術的な面の丁寧な指摘と助言を頂いた。

2. 水井戸検層としての検層項目について

経済的見地から、従来、水井戸は油井に比べて深度が浅いため、多項目の検層を実施するよりも試料(おもに攪乱試料)を採取する方が安上りであった。しかし今後、水井戸の大深度化、そしてこれによる保全上の、精度ある、より多数の情報の要求は益々増大する傾向にあることは世界的にみても明らかであり、多項目の検層を同時に行う必要性が増大するであろう。

放射能検層(密度検層とガンマ線検層)は、水井戸に用いる検層法として、従来から用いている電気検層(ノルマル比抵抗とSP)に次いで経済性の高い方法であるとされている。したがって、経済性を考慮する水井戸検層の項目にはノルマル比抵抗、SP、密度とガンマ線の4つが挙げられる。

本報告は、帯水層を知るための密度検層を研究するのが目的であるが、従来法である電気検層のデータとも比較する部分もあるので、ここではこれらを含めて、水井

戸検層としての各種検層の基本的特性の要点を記しておく。

密度検層 帯水層のおもな構成要素である砂成分の主体をなす石英密度は 2.65 g/cc であることから、検層上の実験的な粒子密度は 2.65 として求められるが、粘土鉱物の混入が誤った粒子密度の見積りを導びく可能性は否定できない。例えば、カオリナイトとモンモリロナイトは 2.60-2.62 g/cc の粒子密度であるので、正確にはこの粒子密度値を粘土分中に算入すべきである。帯水層が粘土分を含む砂からなる場合、容積密度は間隔率 (ϕ) に依存するだけでなく、粘土の密度 (ρ_c) と粘土分 (V_c) にも依存するので、密度検層から求める間隔率の相互関係は次のようになる。

$$\rho_D = \phi + V_c \cdot \phi_D = \phi + V_c \frac{\rho_g - \rho_c}{\rho_g - \rho_f}$$

ここで、 $\rho_c < \rho_g$ の関係が常に成り立つので、密度検層で粘土分を無視した場合の見積りは大き過ぎる傾向を示すようになるといえるが、實際上、 $\rho_c = 2.60$ を仮定し算出すると、 $\phi_D = \phi + 0.03V_c$ となる。

他方、GRANBERRY and others (1968) の研究によると、推測による粒子密度の誤差 $\Delta\rho_g$ とこれから算出する間隔率の誤差 $\Delta\phi$ との間には実際に存在しうる堆積状態の範囲内において、グラフからみて $\Delta\phi \approx 50\rho_g$ の関係があり、不正確な粒子密度で推測する間隔率誤差は粒子密度誤差の約 50 倍に等しい。したがって、例えば 0.05 g/cc の粒子密度誤差は約 2.5% の間隔率誤差を生むことになる。

いずれにしても影響は小さいといえるが、逆な見方をすると、密度検層単独では帯水層中の粘土分を見積ることはできない。

なお、容積密度は次式で説明することができる。

$$\rho_b = (1 - \phi)\rho_g + \phi[q\rho_c + (1 - q)\rho_f]$$

ここに、 ϕ は有効間隔率、 q は粘土に含まれる流動しない水である。

ガンマ線検層 ガンマ線検層を水井戸として単独で使用する場合、粘土分の賦存の確認とその見積り、そしてこれによる透水性の減少を見積ることが可能である。しかし、現段階の技術では測定原理上と機器の感度面に問題があるため、まだ定性的な解釈をすることにとどまり十分その特徴を發揮するまでには至っていない。

砂に比べて粒径の小さい粘土分子は、地層中ごく普通に存在し、おもに砂・礫からなる帯水層中にも程度の差はあるが存在する。この粘土自体非常に大きな間隔率を有するにもかかわらず、この間隙中に介在する水分の多くは前述のように産出の不可能な流動しない水である。

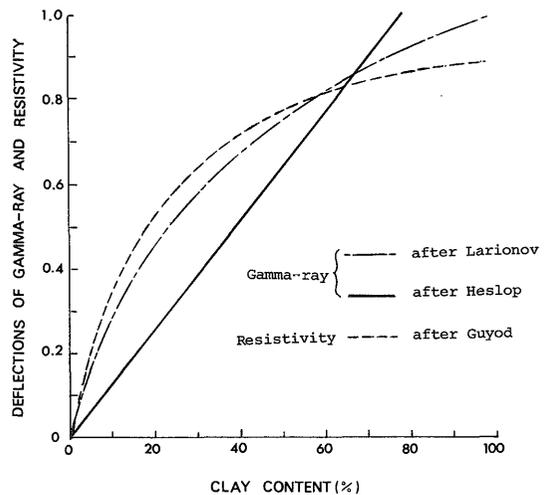
したがって、帯水層中の粘土分はみかけ上の全間隔率を増大するが、逆に、有効間隔率と透水性は減少する。それ故、粒状帯水層においては、粘土分混入の有無とその比率を認知しないで間隙の大小だけから透水性を正確に論じることはできない。そのため、粘土・砂・礫の堆積状態を正確かつ詳細に知ることが重要になる。

帯水層のおもな構成鉱物である石英は、自然ガンマ線の強度が非常に小さい。それでも放射線レベルが一定であり、地層中この砂と粘土分以外の他の鉱物が放射性をもたないならば、自然ガンマ線と粘土分の関係は比例関係で表わすことができる。

第 1 図は砂層中の粘土量の増減がガンマ線と電気比抵抗に影響する各傾向度合の関係を示している。HESLOP (1974) はコア試料の X 線分析による正確な粘土量とガンマ線検層の応答とを比較検討した結果、比例関係にあることをつきとめた。そして、先に Lavionov が作成している非線形曲線傾向のあいまいさをつくると同時にこれを否定した。

また、粘土量に対する電気比抵抗の関係についての研究は、ガンマ線との関係についての研究よりも以前に GUYOD (1966) によりなされていて、第 1 図中の点線は水比抵抗の 1/10 と仮定した場合の粘土比抵抗と粘土分との間の平均的な曲線傾向の関係を示している。図中、粘土量に対する比抵抗と Lavionov のガンマ線の両関係曲線はともに非線形であり、粘土量の増大に伴う変動傾向もよく相似している。

HESLOP が X 線分析に用いたコア試料についての詳細



第 1 図 粒状帯水層の粘土分に対するガンマ線と比抵抗の応答

Gamma-ray and resistivity vs the clay content for a granular aquifer.

は不明だが、測定原理上、ガンマ線検層応答は比抵抗検層応答ほど粘土の混入形態の相違による影響が大きくないことは事実であり、粘土量変化に対するガンマ線検層応答は種々の測定誤差を除けば粘土の混入形態の相違と無関係にほぼ直線的に分布するとみるのが妥当である。

しかし、粘土の他にシルトが加わると多少その様相が変わる可能性がある。シルトはおもに微細粒の石英を主鉱物とするものの、この他に長石やカルサイトなども含むために、砂よりも幾分放射線強度が大きくなり、これらの間の関係は多少複雑になるからである。なお、その他の特別な鉱物として、海成粘土にみられるようなポタシウムを含む粘土はこれを含まない普通の粘土に比べて数倍大きい放射線強度を示すので留意が必要である。

いま、 γ ; 全ガンマ線強度、 γ_A ; 砂・礫のガンマ線強度、 γ_B ; 粘土・シルトのガンマ線強度、 B ; 粘土・シルトの容量、そして ϕ_B ; 粘土・シルトの間隙率とすると、全自然放射線強度の分離的考え方は次のように表わされる。

$$\gamma = \gamma_A(1 + B - \phi_B) + \gamma_B B(1 - \phi_B)$$

ノルマル比抵抗検層 比抵抗検層に関係する真の比抵抗とみかけ比抵抗との間の値差は硬岩層のような高比抵抗帯では大きくなるが、未固結の帯水層のような比較的高間隙率の地層においては、一般にその差は小さい。したがって、定性的に値を用いる場合には支障がない。

比抵抗検層による帯水層の定性的解釈から、次のような2つのことがいえる。

1) 地層係数 $F = R_o/R_w$ の経験的關係から、 R_w は単位井の深度間でほぼ一定なので、 R_o が大きいほど F が

大きくなり透水性も増大する傾向がある。

2) 間隙率が大きいほど、粘土の含有率が增大するほど、そしてまた水中の塩素イオン濃度が大であるほど R_o は小さくなる (實際上、これらは SP やガンマ線の検層図とともに解析され区別される)。

しかし、透水係数は前述のように、間隙率と必ずしも相関しない。したがって、間隙率と最も関係の深い F や R_o と必ずしも相関しない。SARMO and RAO (1963) もまた R_o/R_w と粒度の両対数グラフから、粒度が小さくなるほど FF が小さくなることを示している。故に、透水性は正確には F (または R_o) と粒度の両方に関係するものといえる。

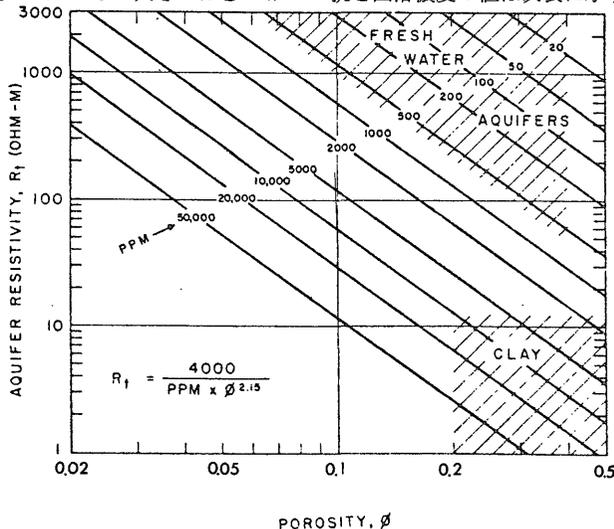
GUYOD (1966) は、 $R_t = F \cdot R_w$ 、 $F = A/\phi^m = 0.62/\phi^{2.5}$ (数値は HUMBLES による)、そしてまた、水中の全固溶成分濃度が 3,000 ppm 以下のとき、水比抵抗は塩素イオン濃度に無関係に一定となるので、この近似定数を K と置くことができる。したがって、固溶成分との間には $R_w = K/\text{ppm}$ の関係が成立する (Agriculture Hand book 60, USDA による)。

以上、3つの関係式を結合して粒状帯水層に用いる新しい式を次のように導いている。

$$R_t = \frac{0.62K}{\phi^{2.15} \cdot \text{ppm}}$$

なお、上式の関係は第2図に示すように、 K は温度 25°C のとき平均 6,500 になる。

上式または第2図から比抵抗の半定量的なデータを得ることができるほか、一般的には帯水層と粘土層の比抵抗と固溶濃度の値は次表に示す範囲にあるものといえよ



第2図 塩分水を含む間隙率に対する粒状帯水層の近似比抵抗 (Guyod による)

Approximate resistivity of granular aquifers vs porosity for several water salinities, after Guyod, 1966.

	帯水層	粘土層
比抵抗 ($\Omega\text{-m}$)	50—1,000	2—20
固溶濃度 (ppm)	50—500	5,000—20,000

う。

SP 検層 坑井内の自然発生電位 (SP) は近似的に次式で与えられる。

$$SP = -K \log_{10} \frac{R_{mf}}{R_w}$$

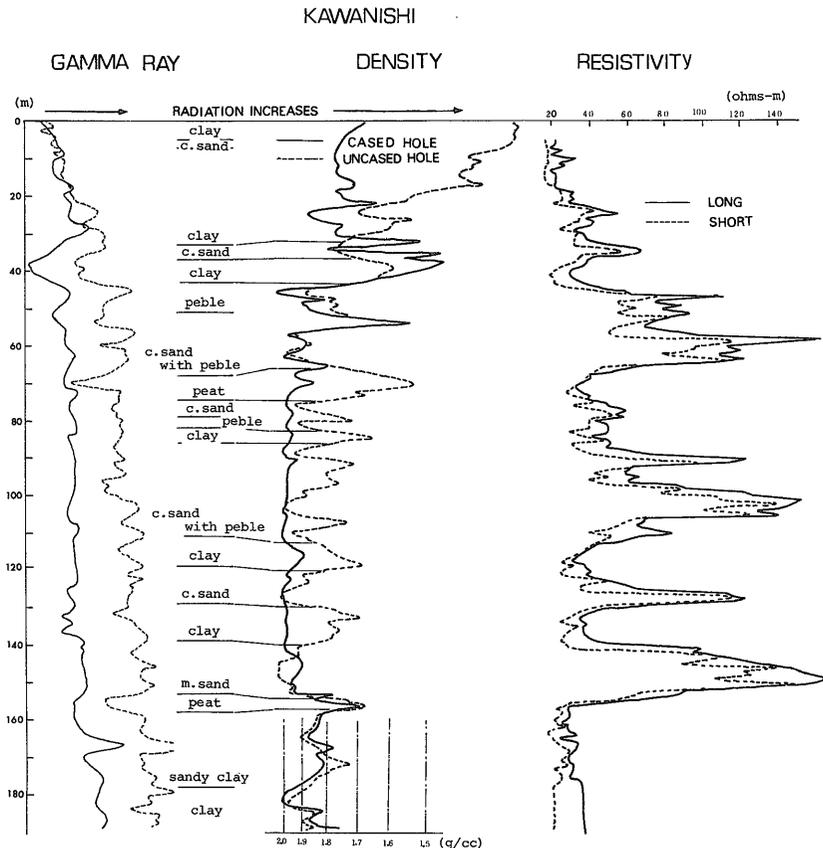
ここに、 K は浅い深度の場合、温度 25°C で 71 mV ($K = 60 \text{ mV} + 0.133 T^\circ\text{F}$ を用いる人もいる) になる係数である。しかし上式の関係は SP 検層の測定原理上、粘土分の存在を抜きにしては成立しない。また、粘土分が存在していても、礫・砂・粘土の各区分が判然としない未固結の粒状堆積物中ではしばしば電気的な安定を欠く。そしてこれに坑内泥水の不均一性などの素因も加わって、

理論通り解釈できない場合の方がむしろ多い。しかし、SP の一般的または定性的な傾向としては次のようなことがいえる。すなわち、帯水層中の塩素イオン濃度が掘さく循環泥水中の塩素イオン濃度よりも大のとき、帯水中の SP 応答は近接の粘土層よりもマイナス方向に偏る。そしてまたこの逆も成り立つ。

3. 試験の経過について

昭和49年度の試験 (山形県川西、および群馬県伊勢崎の各地点) 昭和48年度以前までの密度検層に関する報告 (小鯛, 1973, 1974 a, b, c) は、帯水層を詳細に評価するために、検層応答に影響する坑井諸条件を一層明確化しなければならないことを教示した。それで、昭和49年度は山形県川西および群馬県伊勢崎の2地点の坑井について、ケーシング挿入前後における検層応答を比較検討した。

前者地点における坑井地質柱状は、全体的に粘土質部



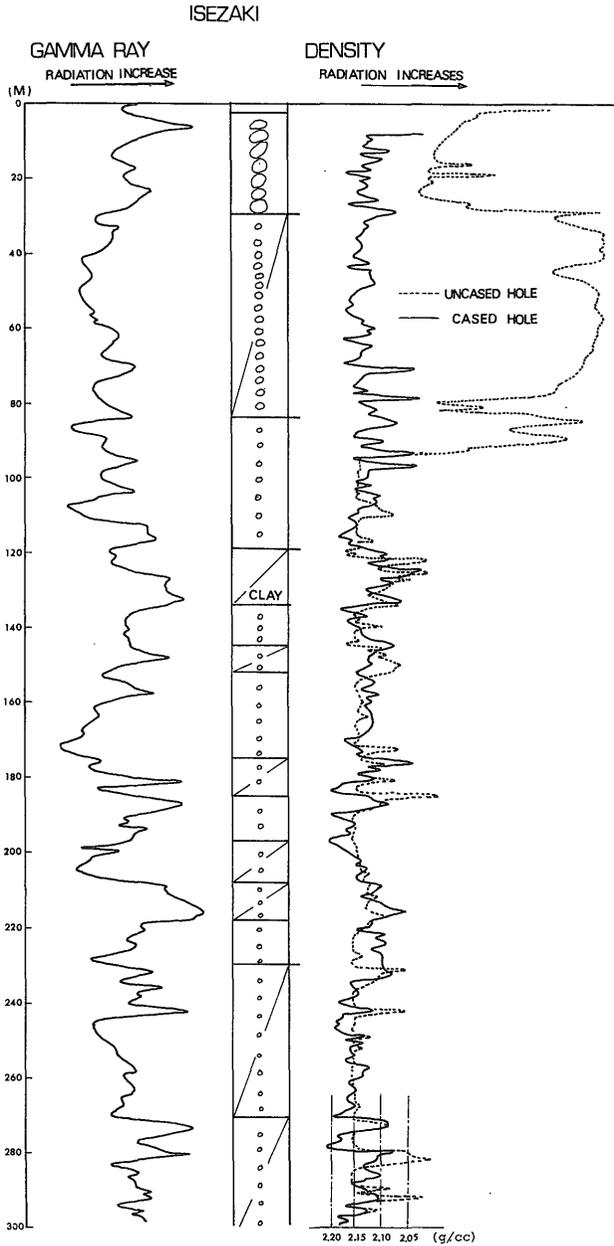
第3図 山形県川西地点井での各種検層図

Various logs made before and after a well is cased, Kawanishi Yamagata prefecture.

分が多く、密度的に小さい地層が垂直的に分布し、後者地点では礫と砂とが主体であって、比較的高密度の地層が垂直的に分布している。

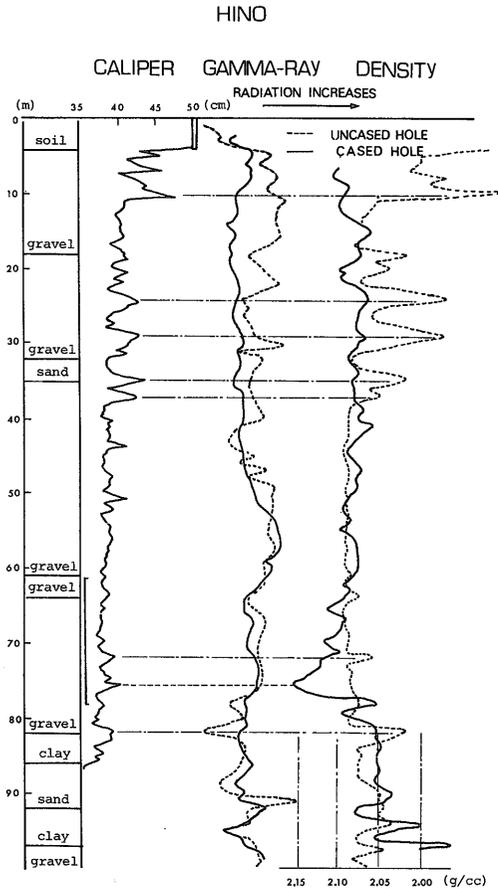
昭和 50 年度の試験 (山梨県山梨と山形県川西の各地点) 前年度に試作した水井戸用キャリパー検層機(4.2 参照)を用いて、裸坑時におけるキャリパー検層と放射

能検層およびケーシング挿入後の放射能検層を山梨県山梨地点井で実施し、内壁の荒れの検層応答への影響度を実際に検討するためのデータを得た。その他、グラベルパッキングの経時的安定性をチェックするために、掘さく終了時から 1 年余経過した水井戸 (山形県川西地点) において再度放射能検層を実施した (この解析説明は 6.



第 4 図 群馬県伊勢崎地点井での各種検層図

Various logs made before and after a well is cased, Isezaki Gunma prefecture.



第5図 山梨県山梨地点井での各種検層図
Various logs made before and after a well is cased,
Yamanashi-shi Yamanashi prefecture.

を参照).

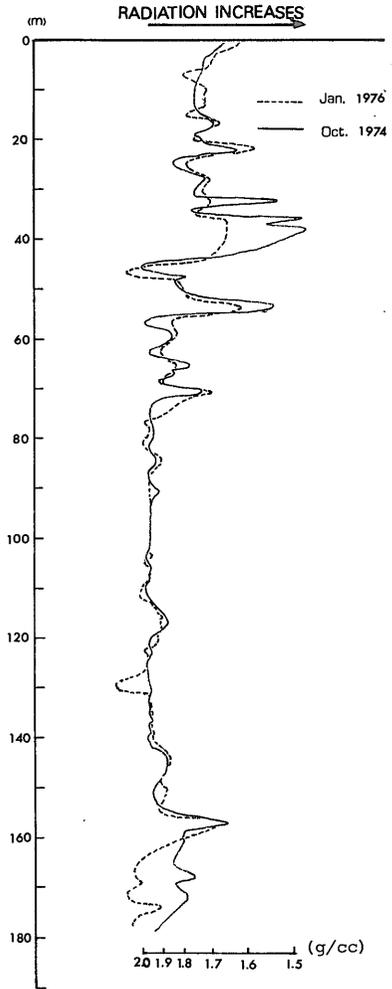
昭和51年度の試験 (伊勢崎地点) 厚いグラベルパッキングならびに高密度層中の密度検層は、応答感度を縮小させ、測定精度の劣化により、容積密度差による地層判別や物理定数の定量的算定に支障をきたすことが予想されたので、この問題を解決するために、強線源の使用とビーム状照・入射窓をもつプローブを試作し (4.3参照)、伊勢崎地点において試験を実施した。第7図は伊勢崎地点の同一井で異なる強度線源を用いた改作前後の各プローブにより測定した密度検層応答を比較している (解析説明は7.参照)。

4. 装置類の試作・改造

4.1 キャリパー検層機について

わが国で、キャリパー検層技術に関する総括的かつ理

DENSITY LOGS (in cased hole)



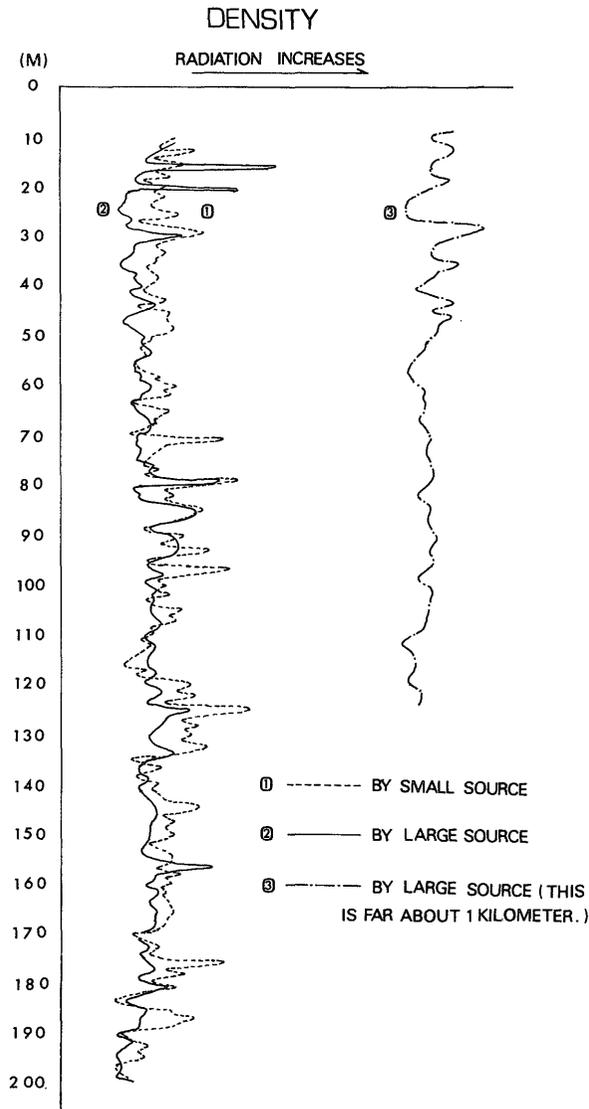
第6図 川西地点井で1年3カ月を隔て試験した密度検層応答の比較

Comparison of density logs made on different dates in the same hole, Kawanishi.

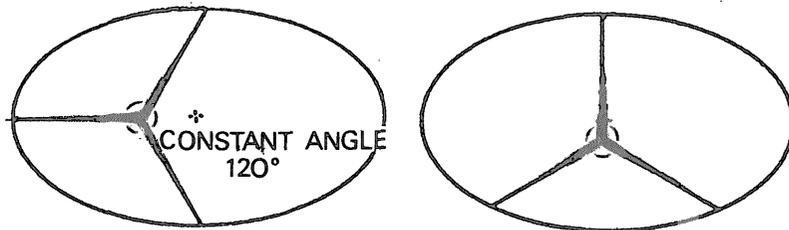
論的な研究報告はないので、HILCHIE (1968) の報告を主な参考として概説する。

原理上、キャリパー測定機構は機械的なものと超音波を利用したものがあるが、後者は実際上あまり使用されていないので前者の機械的方法が多く用いられている。

機械的キャリパー検層はまた、アーム数、坑壁への接触方式ならびに接触圧などの組合せによりそれぞれ特徴



第 7 図 同一井中, 異なる強度線源を用いて得られた密度検層応答の比較 (伊勢崎地点)
 Comparison of density logs made on different quantity of Cs-137 source in same hole, Isezaki.



第 8 図 楕円坑中のキャリパープローブの安定位置
 The stable position of caliper arms in an elliptical hole, after Hilchie, 1968.

あるものが作られ用いられている。

アーム数は一般に1-4本である。1アーム方式は坑の片側の荒さを感じるだけなので、一般に均一性を欠く。2アームは最小のバランスを確保するための数であり、真円でない坑断面の長径方向を、安定上、常に測定する傾向があるので、平均の直径より常に大きめな径を示す傾向になる。3アーム方式は、坑径がだ円であるとすると、第8図に示すように最小エネルギーで最大径になるような最もありうる位置に安定し、その幾何学的面積の精度は比較的安定している。以上で説明したアームの測定方式はすべて一元方式であり、4アームについても古くから使用されているものは同一一元方式である。この一元4アーム方式は3アームと比べてむしろ劣っている。その後二元アーム方式を用いるに至ってその特徴を発揮するようになったが、非常に高価になるため、いずれにせよ一般性が小さい。さらに、アーム数の多いものはこれまでごく特殊な使用例があるだけである。

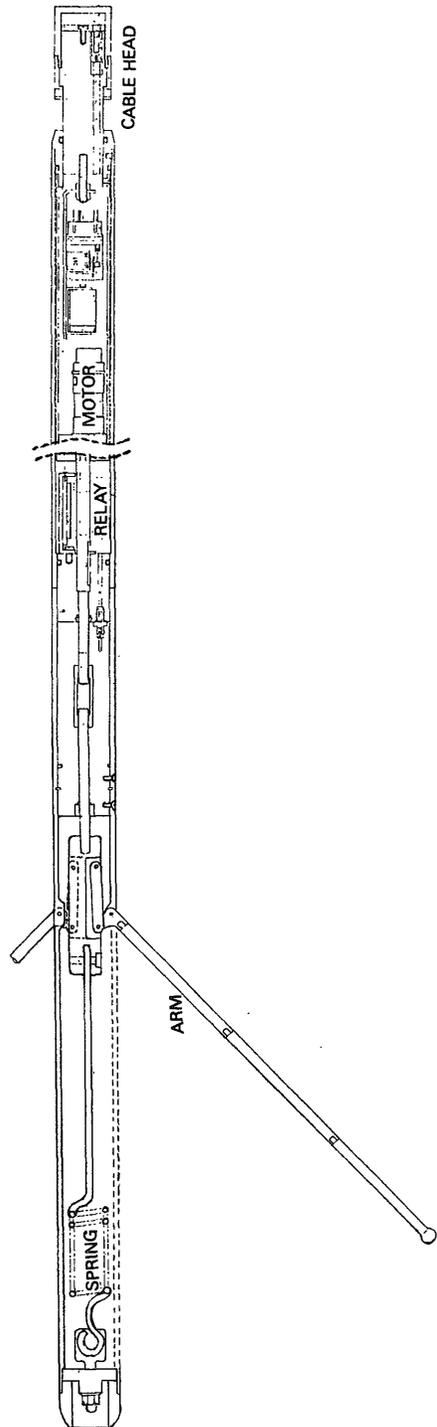
アームの接触方式はフィンガー、スプリング、そしてパッドの3種類があり、測定精度と坑内状態のかねあいから、それぞれの方式が選ばれることになる。そして、この各方式の接触面積に逆比例して、高・中・低の3段階の接触圧に対応するのが普通であるが、ある特別な理由(マッドケーキ面上、またはそれを切つての測定を目的にした場合)のために、変則的な圧力に設計する場合もある。

以上のような各種のキャリパー測定方式が考えられ使用されているが、実用面からこれを区別すると、

1) 各種のおもな検層プローブ自体を偏心または中央に固定して、安定した応答を得ることを第一の目的とするために、プローブ中に、この検出部と一緒に結合し内蔵するキャリパー。

2) キャリパー測定だけを目的とし、精度上一層の考慮がはらわれている純キャリパー検層機。

とに分かれる。1) の用途で現在までに使用されているおもなものを挙げると、まず放射能検層機については、シユランベルジャー社と Welex 社のものが1アームパッド方式であるほかは、すべて2-3アームスプリング方式である(しかし、この中にはキャリパー測定機構を備えていないものもある)。次に電気検層ではマイクロ検層機が最も多く使用されている。そしてその機構上はおもに2アームパッド方式を採用している。他方、2)の純キャリパー検層としてこれまで使用されているものには、一元3アーム・フィンガー、一元または二元の4アーム・フィンガー、二元アーム・スプリング、そして二元4ア



第9図 水井戸用純キャリパープローブの構造
Mechanism of the pure caliper tool applied to measurement of larger hole diameter.

ーム・パッドの各種方式があるが、性能と経済性とのかねあいから、一元 3 アーム・フィンガー方式が最も一般的に用いられている。今回試作し実験に用いた方式もこの方式を採用している。

4.2 純キャリパー検層機の試作

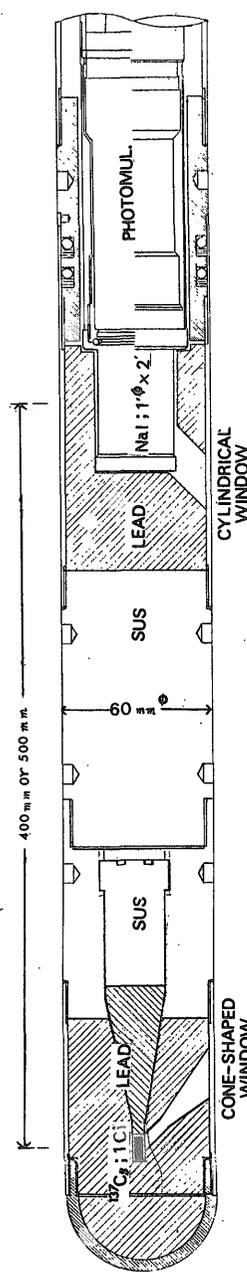
従来から、国産のキャリパー検層機はマイクロログーキャリパー検層機 (2 アーム・パッドのキャリパー) だけであるが、前述のように、このタイプがマイクロログを主目的として製作されたパッド型であるため、水井戸のような、おもに未固結堆積層を掘さくし完成途中にある裸坑中の検層では、地層との接触面が大き過ぎて坑壁崩壊によるプローブ着着の危険性を伴うほか、キャリパーの測定精度も多くを期待できない。また、水井戸のような比較的大口径の坑径測定に合致した長い 3 アーム・フィーラ型のキャリパー検層機を購入するとなると外国製品に頼らねばならないので高価になる。それで今回はハウジング機構とモータ駆動方式についての技術経験が豊かな国内メーカーに上記水井戸用キャリパー検層機の製作を発注し試作した。

おもな試作部分は、スプリングとその支持機構、および 3 アームの拡大ならびに開閉機構であった。このうち、スプリング本体の設計は特に重要なポイントになる。すなわち、測定対象になる井戸径とその坑内壁の荒れ、アーム数、そして支持部のテコ倍率から、各先端部にかかる接触圧力 (プローブを中心に支持するための力と、坑壁径変化に即応させる力) を考慮し、最も適切な圧力範囲におさまるスプリング強度を設定 ($P = G \cdot d^4 \cdot s / 64 \cdot m \cdot R^3 = 18.3 \text{ kg}$) した。

4.3 高密度層解析のための対策 (プローブの改造)

これまで使用してきたプローブと線源 (^{137}Cs , 10 mm Ci) は、高密度層解析に不十分であり、この点さらに改善する必要があることが予想された。この対策として、はじめにガンマ線の透過率が優れている ^{60}Co 線源の使用を考えたが、 ^{137}Cs 線源が低エネルギー散乱 (ガンマ線応答域で非常に効率がよい) という利点を捨てきれないために、大線量 (1 Ci) の ^{137}Cs の使用を計画した。これにより真の散乱計測¹⁾へより近づくためのビーム型方式を採用できるので、良好安定な応答が得られるはずである (第 10 図参照)。

付)……安全管理の面からみた大線源 1 Ci は野外試験のため小型自動車に他の装置とともに積載でき、しかも人力で容易に持ち運び可能な重量・容積の限度に近いものである。そして、放射性物質安全管理規定に関する法



第 10 図 高密度層解析のためのビーム型プローブ Mechanism of the probe for using a large source (Cs-137 , 1 Ci).

律に基づく身体と手足の被ばく線量の限度、すなわち年被ばく線量、実情にあった管理区域内外での放射線遮へい能力、そして自動車で搬送するための条件が居住係数ならびに使用係数を許容計算してもなおかつ満足する範

1) 密度検層機の実用上の妥協的設計であるあいまいな指向性密形をもつプローブは、正確にいて散乱計測ではなく拡散計測を意味する。

囲にある強度として選んだ。

5. 水井戸検層における坑井影響の誤差とその除去について

地質的变化以外に水井戸検層応答に影響を与えるいわゆる坑井影響には;

① ビットサイズより決定される口径変化, ② 坑掘さくにおける内壁の崩壊等により生じるしわまたは溝による坑径変化, そして, ③ グラベルパッキングとマッドケーキによる影響が考えられる。

①は1井単位で考えた場合, 離心プローブの応答への影響率が一定となるので問題ない。しかし②は, これが不定であり誤差発生原因になるので, 各検層項目で共同的に問題視されることになる。

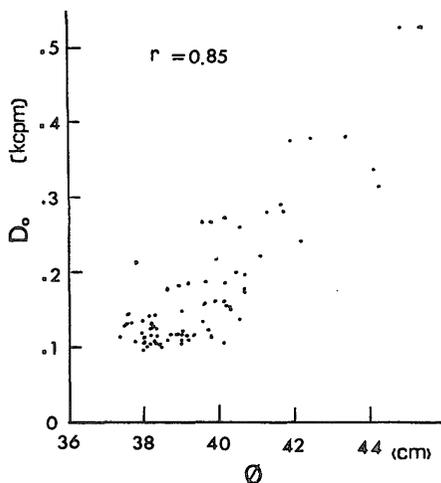
一般に, 坑径 10 cm 以下の小口径で行う放射能検層での坑径影響は無視できるが, 水井戸のような大口径で行う放射能検層……特に密度検層に対しては坑径影響が大きくなることが判っている。

また, ③中, 裸坑での密度検層において, マッドケーキの影響は油井に比べて水井戸の深度が浅いこと, それで, 循環泥水の比重と量がいずれも小さいために, その影響度は坑径変化に比べると微小で問題にならない。グラベルパッキング量は, 密度検層の場合, ケーシングと坑壁間の断面積中に充填される性質上, 坑径の変化と常に一緒に考慮すべき問題であり, 次節以下で論じる主題でもある。

5.1 密度検層

裸坑中の密度検層 大口径井中での密度検層において, 坑径変化と検層応答との間の関係は, 坑径が大きくなるほど応答を増大させ, みかけの密度を減じる傾向のあることが判っている。第5図中, キャリパー検層と裸坑中の密度検層曲線とを比べてわかるように, 密度検層曲線の各ピークは坑径の拡大部分を示している。すなわち, 24, 35, 37, 72, そして82mの各深度の箇所がそれらである。そして, 深度 75 m 前後のところは, 高密度(礫層)なので, 本来低い応答レベルであるべきところが, 坑径拡大により裸坑中の検層曲線では平滑になり, ケーシング坑中の検層曲線ではマイナス方向にくぼんだ曲線になっていくことが理解できる。この坑径変化と密度検層応答との相関性は第11図に示すように相関係数0.85でかなり高い。

これは次のような理由による。裸坑壁の荒れによる溝部分での応答が増大する他, 使用したプローブのサイド・コリメート設計が, 水井戸(ケーシング挿入井)用としてなされているため, 水井戸完成途中の裸坑中で使用



第11図 ϕ - D_0 相関

Plots of hole-diameter (ϕ) by caliper logging to density-log responses (D_0).

した場合に, 坑径の局部的拡大部分に対して, プローブの偏心機構(固定式2スプリング)が十分に即応・追従できないで, プローブと坑壁間にできたと思われる隙間がこれを助長する。加えて, 坑径が拡大しやすい地層はおもに比較的軟弱な粘土質の部分であり, この部分は密度が小さいので応答の増大をさらに助長する結果になる。

はじめに述べたように, 裸坑検層はケーシング挿入井での検層との比較のため特別に実施したに過ぎないため, 裸坑検層に最適の方式による試験ではなかったが, わが国のおもな地下水賦存層においては, プローブ構造上片側を大きい力で圧着させて測定することが, 井戸の保安上危険が大き過ぎ実際に実施困難であることを付言しておく。

もし, 地層が未固結性でなく固結性であれば, 上記のような危惧はなく, この場合の過去の研究例は本研究に非常に参考となる。それで以下, この場合の外国における報告例を概説する。

アメリカ合衆国地質調査所の KEYS and other (1971, p. 73-74) は, サイドコリメート形式の市販プローブと坑内中央に自然垂下させ測定する方式である同軸形プローブとの比較試験の結果, 前者は後者よりも坑径影響を縮小させてはいるものの, 理論通りにきれいに除去できないことを報告している。また, このような一般市販のサイドコリメート型式の機器を使用した場合におけるプローブと坑壁間の 1 cm の溝発生に対して 4-25% の誤差

を生じるという報告例もある。

多くの場合、裸坑中で検層が実施される油井検層において、上記問題で生じる誤差を除去するために改良した機器として次のようなものがある。

1) WAHL and others (1964) による FDC (Formation Density Logging Device) —これは2重間隔検出法 (Dual Spacing Method) と呼ばれ、シュランベルジャー社のFDLのプロープ内に線源・検出部間の間隔を異にするもう1つの検出部を追加内蔵し、2つの検出部間の値差から誤差を除去できるように改良してある。

2) HEARST and other (1969) による RIDS (Rugosity Insensitive Density System) —これは、ガンマ線の照入射窓部に相当するプロープ外面に、歪計内蔵の突出部をもうけ、坑壁に密着しているかどうかをチェックし、自動的補正を可能にしたシステムである。

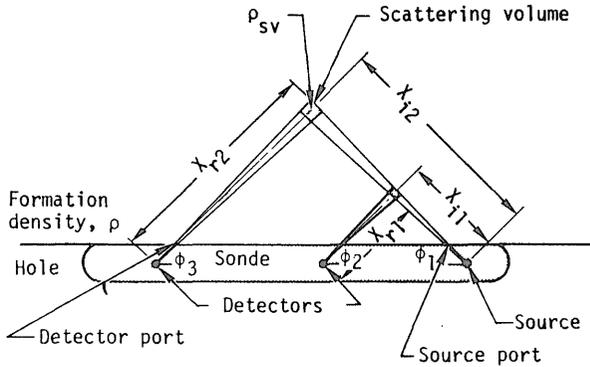
その後、HEARST (1976) は、WAHL and others (1964) による2重間隔検出法の理論的解析を行っている。すなわち、

検出部 (n) での受信数 I_n の基本式は次のようになる。

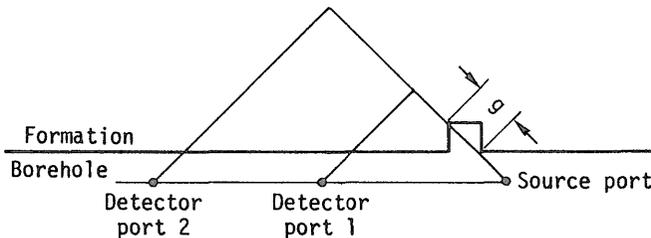
$$I_n = K_{sn} \rho_{svn} \exp(-C_{in} \rho X_{in}) \exp(-C_{rsn} \rho X_{rn}) + K_{dn} \rho_{svn}^2 \cdot \exp(-C_{in} \rho X_{in}) \exp(C_{rdn} \rho X_{rn}) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 K_{sn} = 単散乱係数、 ρ = 媒体中の光子密度、 ρ_{svn} = 検出部 (n) の散乱量束、 C_{in} = 線源からの減衰係数、 X_{in} = 検出部・散乱点間の距離、 C_{rsn} = 検出部への単散乱減衰係数、 X_{rn} = 散乱点と検出窓間の距離、 K_{dn} = 2断面間の2重散乱係数、 C_{rdn} = 散乱点から検出部への2重散乱減衰係数、したがって、第1項は単散乱項であり、第2項は2重散乱項となり、各項の初めと次の各 \exp は、線源・散乱点間および散乱点・検出部間の各散乱確率を意味する。

彼はまた、この基本式に対し、 $C_{rsn} = C_{rdn}$ 、 $\rho = \rho_{sv}$ 、 $C_{i1} = C_{i2} = C_i$ および $C_{r1} = C_{r2} = C_r$ ならびに、検層プロープを $X_{in} = X_{rn} = X_n$ および $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$ にデザインするものと仮定し、さらに $KS = OK_{s2}$ 、そして $K_{d1} = QK_{d2}$ と仮定することにより、坑壁の荒れやマッドケーキがないときの2重散乱を含む単純化した式を示す。



第12図 密度検層の2検出法プロープ (Hearst による)
A two-receiver density sonde against a borehole wall, after Hearst, 1976.



第13図 坑壁小崩壊に対する線源・検出部間のレイアウト (Hearst による)
Layout of source and detector ports with a small washout, after Hearst, 1976.

$$I_1/I_2 = Q \exp [\rho C(X_2 - X_1)] \quad \dots\dots\dots(2)$$

この式から真の密度値を求め、この式が単散乱だけを考えた式と一致するので、上記の仮定が合理的仮定であることを立証した。そして次式を導びき、

$$\rho_{app} = \rho_{true} + C_{rg}/w \quad \dots\dots\dots(3)$$

(ただし、 C_{rg} = 溝中を通過する光束、 $w = (C_i + C_r)(X_2 - X_1)$) 線源と検出部間の光子がそれぞれ溝を通過するときの応答関係から、ゾンデが坑壁と平行な状態において、応答率を平均化させることにより溝影響も除去できるとしている。

さらに、検出部プローブが傾斜している(坑壁に対してプローブの一端だけが接触し、他端が離れている)状態のみかけ上と真の光子密度との関係式を次のように導いた。

$$\rho_{true}/\rho_{calc} = [C_i + C_r \sin(\phi - \alpha)]/\sin(\phi + \alpha) / (C_i + C_r) \quad \dots\dots\dots(4)$$

この式から指向角を小さくした場合に、もしプローブが傾斜したとすると、その影響は比較的に大きくなることわかる。一例として、 $\phi = 45^\circ$ 、そして ^{137}Cs 線源使用により得られる C_i と C_r の値を用いて計算すると $\alpha = 2^\circ$ で4%の誤差、 $\alpha = 4^\circ$ で8%の誤差を生むことになる。

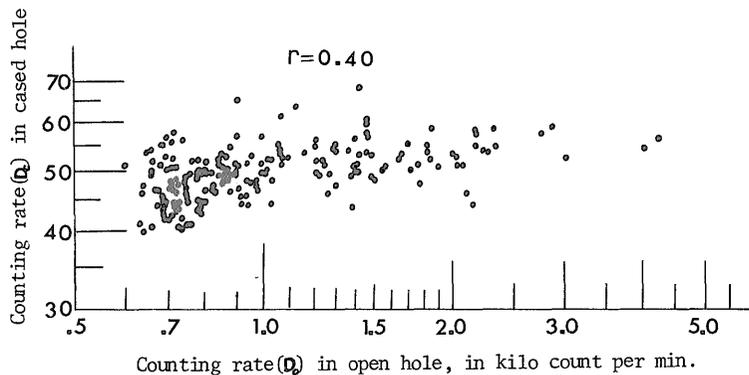
実際には、坑内泥水の存在がこれを相殺し、誤差率はこれよりも低くなるものと思われるが、無視できるほど低くはないので注意する必要がある。

ケーシング挿入坑中の密度検層 上述した裸坑中での密度検層応答に比べて、ケーシング挿入坑中での密度検層応答は坑径の変化にあまり影響されない。したがって、第14図に示すように、裸坑中の密度検層応答との間の相関性も低くしている。それでは、ケーシング坑中の

密度検層応答は坑径変動の影響を受けないで、地層変化だけを忠実に表現するかという点とそうでもない。もし、坑径の拡大部分がグラベルパッキングの容積密度よりも低い粘土質の堆積物の場合、グラベルパッキングはケーシングの外側と坑内壁拡大部分の間に厚く充填される結果となり、それが一定厚の部分に比べて低い応答を示すこととなり、みかけ上高密度に見積られることになるので、裸坑中での密度検層応答とは逆の傾向を示すことになる。

水井戸は、ケーシングの挿入と、その後の坑壁とケーシング外壁間への礫材のパッキング終了をもって工事を完了させる性格上、坑径変化とこれに伴うグラベルパッキングの厚さの変化とは常に一緒に包含された問題として取扱われることになる。一般に、厚いグラベルパッキングや高密度層中での密度検層は極端な応答の減少をまねくため、統計誤差が相対的に大きくなり、精度が劣化する。HEARST (1976) はまた、前節(4.1)で記したような2重間隔検出法による坑壁の荒れやプローブ傾斜により生じる誤差を理論的に除去する考え方の他に、マッドケーキに対する考え方も示している。これによると、水井戸の場合で、もしグラベルパッキングの厚さが一定であり、長・短両方の線源・検出部間隔で2度検層を実施するならば、裸坑検層とケーシング坑検層の後方散乱率の相違を考慮しながら、この理論的考え方を応用できる。しかし実際的にはむしろグラベルパッキングの厚さが変動する場合に大きな問題がある。

筆者は過去の報告(小鯛, 1974c, p. 147)中で、線源・検出部間距離を長くした場合に、短い場合と比べた検層応答比が、坑の内径の拡大された部分で大きくなること。それで、坑径の変化している部分は、長短両方の



第14図 伊勢崎地点井での $D_c - D_0$ 相関

Plots for both radiation levels of the cased- and open-holes of density log in figure. 3.

線源・検出部間距離に設定したブローグを用いて2度密度検層を行い、その間の応答比の相違から認知できること。そして、この坑径の変化している部分の補正は、長間隔設定ブローグによる検層応答を基調とすることによりある程度可能であることを示した。

しかしここでは、別なチェック法を試みている。以下、その方法と結果について記述する。

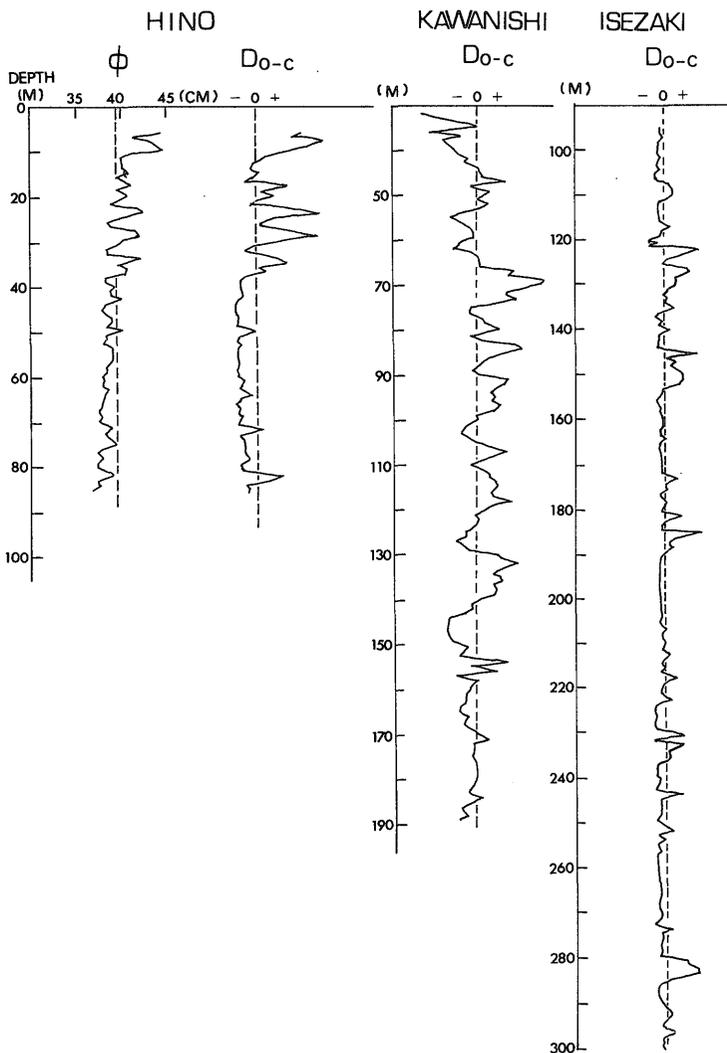
略号

- D_0 ; 裸坑中の密度検層応答
- D_c ; ケーシング挿入坑中の密度検層応答
- D_{0-c} ; 裸坑中 および ケーシング坑中の密度検層間

の応答差

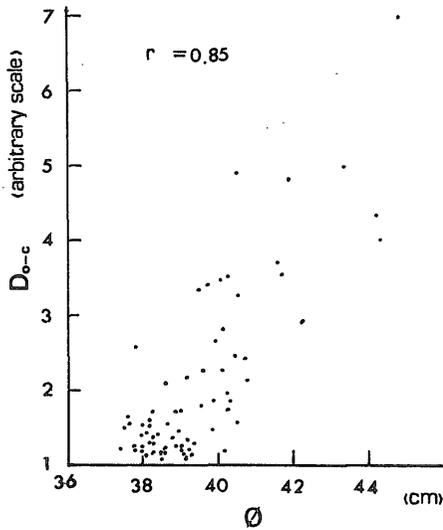
- GR_0 ; 裸坑中のガンマ線検層応答
- GR_c ; ケーシング挿入坑中のガンマ線検層応答
- GR_{0-c} ; 裸坑中 および ケーシング坑中のガンマ線検層間の応答差
- R_0 ; 比抵抗検層値
- ϕ ; キャリパー検層から得た坑径変化値
- r ; 相関係数

第15図の左側半分は、キャリパー検層から得た坑径変化値 ϕ と、 $\sum_{e_i} = CM_{0-c}$ になるような比例定数 C を定めて各深度毎に減算した値 D_{0-c} を柱状に並記したもので



第15図 D_{0-c} 値の垂直分布

Columns of the values calculated from density loggings made before and after a well is cased.



第16図 $\phi - D_{o-c}$ 相関

Plots of hole diameter (ϕ) vs the values (D_{o-c}) calculated from density logs.

ある。一見してこの2つの値はかなり比例していることがわかるが、これを相関図(第16図)にすると、相関係数(r)は0.85となり、相関性の高いことが立証される。したがって、第15図の右側半分(川西地点と伊勢崎地点)の D_{o-c} 曲線も、図の左側の D_{o-c} 曲線(日野地点)と同様に、各曲線の右側変動部分が坑径拡大箇所であると推測される。

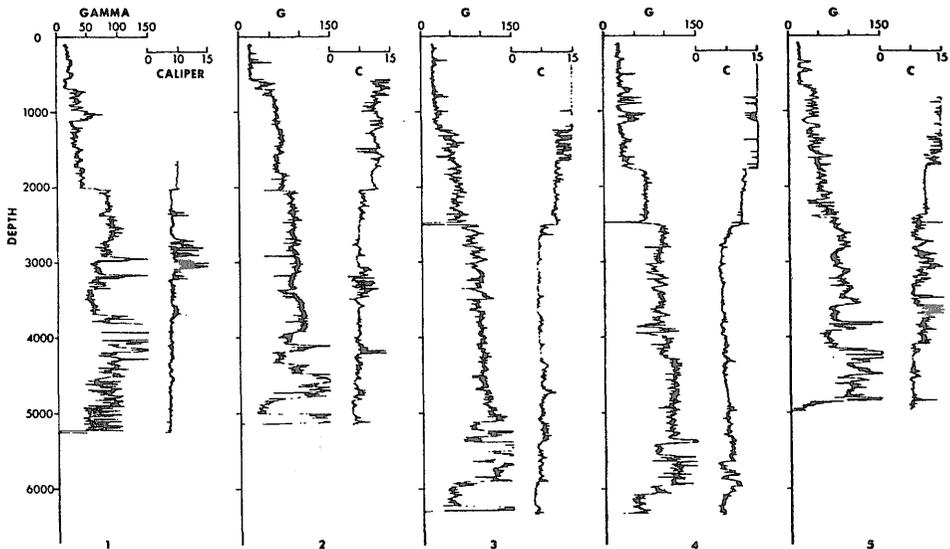
川西地点で最も顕著な坑径拡大部分は、深度67-73mであり、また、深度66-139mの範囲は全体的に拡大している。他方、伊勢崎地点の方は、比較的变化が小さく、したがって坑径拡大率が小さく、そして拡大箇所も少ないことを示している。

5.2 ガンマ線検層およびその他の検層

ガンマ線検層 水井戸の掘さくで、掘さく技術者によりつくられる掘さく柱状図は、粘土・砂・礫に関する詳細な情報を与えはするが、部分的にみて不正確な場合が多い。それは、井戸掘さく中、粘土が泥水により溶かされ流失し、検出できない場合があること、スライム(またはカッティング)による鑑定において深度と層厚のズレが生じやすいことによる。

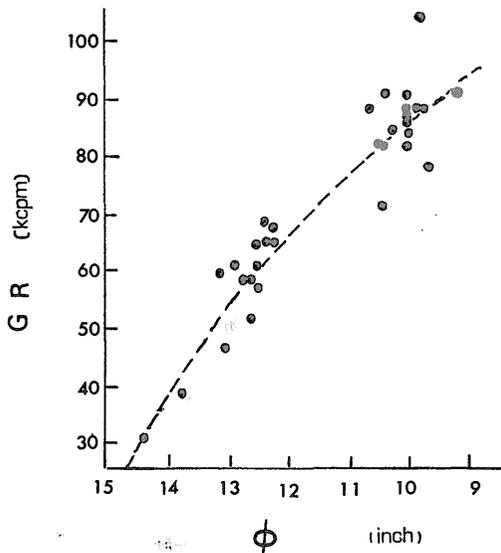
ガンマ線検層は粘土と砂・礫間における各物質固有の自然放射線強度差の検知により、このような不正確部分の補添、ならびに粘土に関するさらに詳しい情報を与えてくれる。

ガンマ線検層の坑径影響に関する研究には、古くはFEARSON(1949)やHYMAN and others(1955)によるものがある。これらによると、坑井とガンマ線強度との理論的關係は、径の大きさと関数関係にあるけれども、検層応答の増減傾向は設定諸条件に左右されるので一概に断定することは不可能である。しかしこれと同時に実施した実験によると、坑径が12インチ位まではガンマ線強度に實際上影響しないという結論であった。



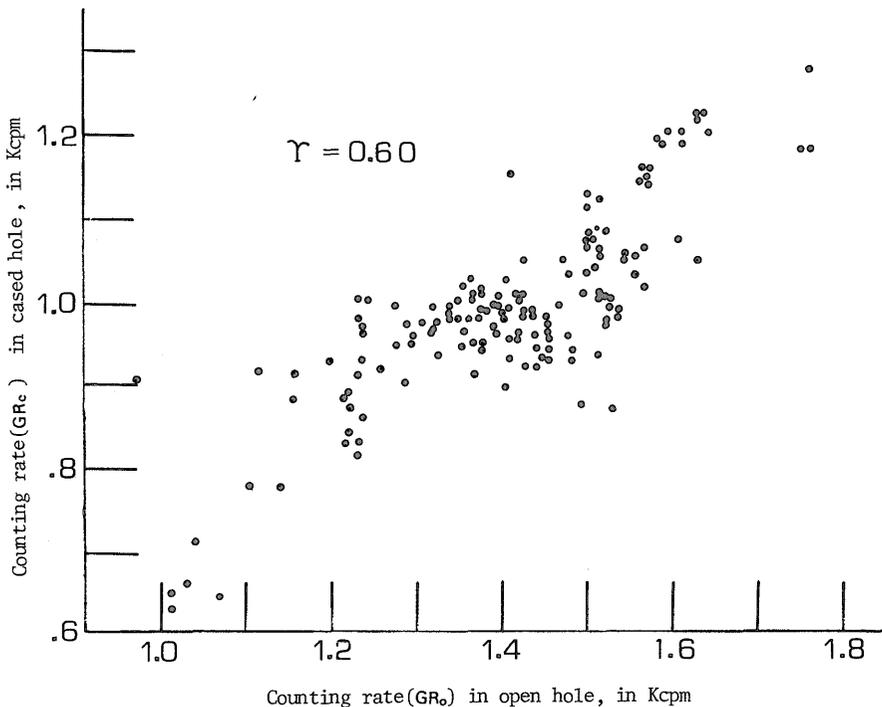
第17図 ガンマ線検層における坑径変化の影響 (Connollyによる)

Effect of hole-diameter changes on gamma-ray logs, after Connolly, 1974.

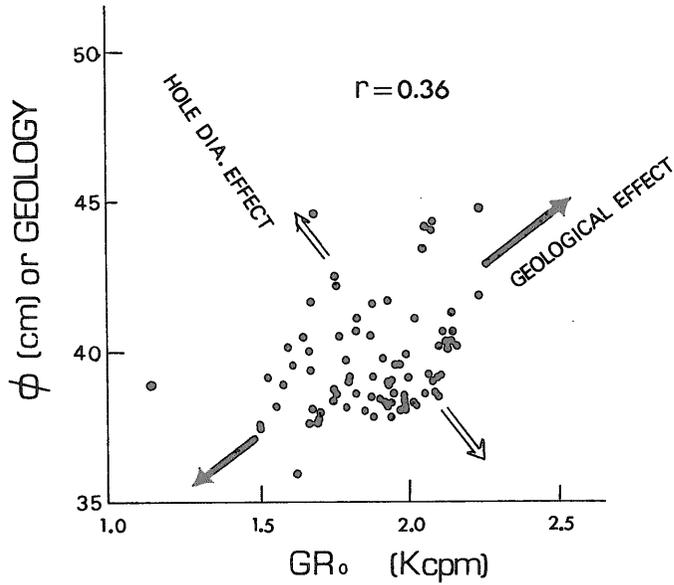


第18図 第17図から導いた $GR - \phi$ の相関
Correlation of gamma-ray log responses (GR)
vs hole diameter (ϕ) obtained from figure 17.

最近, CONNOLLY (1974) は検層実施例から, 坑径変化がガンマ線強度に如何に影響するかをキャリパー検層とその比較から第17図で示した. この図から, 特に比例性の大きい深度 600-4,200 フィート間の相関図を作成 (第18図) すると, 坑径拡大時の応答変化の程度は密度検層の応答率変化ほど急激な曲線状を示さないで, ゆるやかな直線状になる. そしてその傾向は密度検層の場合とは逆に減少方向にあるといえる. しかし以上で挙げた国外の例は, 坑径影響をつかむために地質やその他の条件をそろえて試験を実施した極端な例であり, 地域性にもよるが, 一般にはガンマ線応答は地層からの影響に比べて坑径変化による影響の方が小さいので, GR_c と ϕ の相関性は薄く, 極端な坑径拡大部分がないかぎり定性的な地層判別に支障はない. もし, 坑径が極端に拡大しているとなると, 掘さく技術上, 坑径の拡大は粘土のような比較的の軟らかい部位に発生しやすいという事実と, 粘土のもつ固有の自然放射線強度が砂・礫に比べて高いという理由で, 坑径拡大による応答率減少と粘土層であることによる高応答率が相殺し合い識別困難になることもありうる.

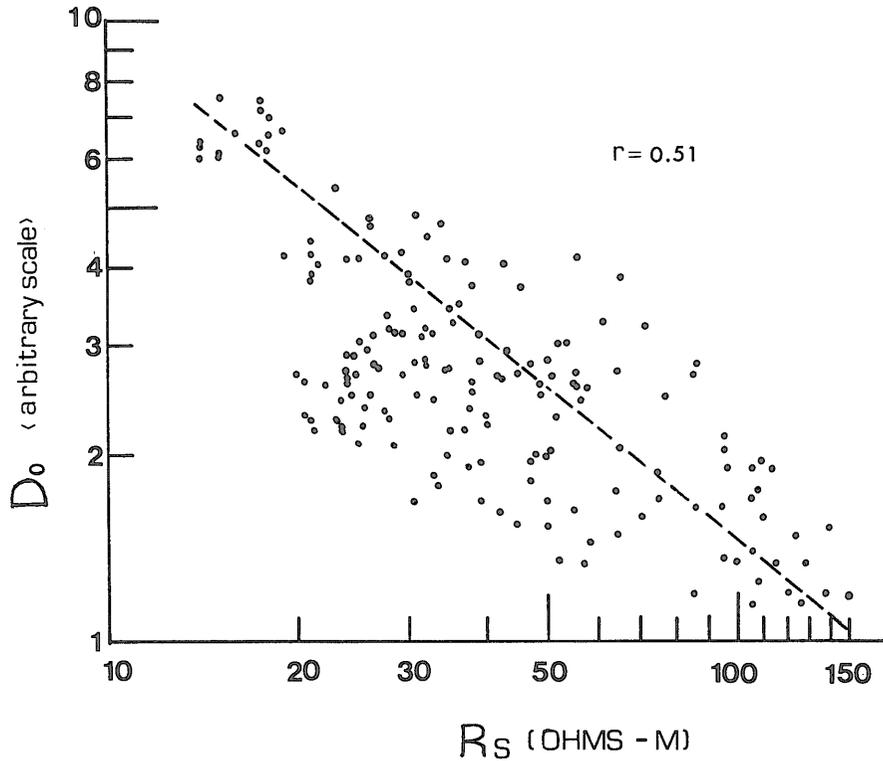


第19図 川西地点井での $GR_c - GR_o$ 相関
Plots for both radiation levels of the cased- and open-holes of gamma-ray log in figure 5.



第20図 $\phi - GR_0$ 相関

Plots of hole diameter (ϕ) vs gamma-ray responses (GR).



第21図 川西地点井での $R_s - D_0$ 相関

Plots of resistivity (R_s) log vs density (D_0) logresponses, Kawanishi.

山梨県日野の各検層図(第5図)はこれまでに記した事項の明確な裏付けとなった。すなわち、局部的にみて(横鎖線で示した各箇所)、密度検層とガンマ線検層の両検層は、坑径変化の影響を受けていて、ガンマ線検層は密度検層とは逆に坑径の拡大で減少することがわかる(注; 裸坑中およびケーシング坑中のガンマ線検層応答は、深度が大きくなるほど増大する傾向を示す。これは坑内泥水の連続的沈殿濃度変化の影響によるものと考えられる)。

ガンマ線検層応答は密度検層応答ほど坑径変化に影響されないということは、第19図に示した $GR_0 - GR_0$ の相関図からさらに明確になる。すなわち、ケーシング坑中の方が応答率を多少増大させるが、相関は直線的比例関係にあり、 $r = 0.60$ とわりあい良好である。よって、応答率は地層自体のもつ自然放射線の大小に大きく関係し、坑径変化の影響はこれに比べてかなり小さい。いま、第20図の $\phi + GR_0$ 相関をみると、みかけ上、坑径の拡大にともない応答率が増大する傾向を示している。第11図の $\phi - D_0$ 相関の性状と同様である。坑径変化によるガンマ線検層応答は密度検層応答とは逆の傾向を示すという法則性と相反するかのように見えるが、実はそうではない。すなわち、図中、 ϕ と GR_0 の正相関性は、内在する地質的な相違とこれにより変化する自然放射線強度との関係を示しており、この正相関のパラッキであるかみえる分布が、実はガンマ線検層応答が坑径変化に影響された負の相関である。これをさらに具体的に説明すると、多くの水井戸掘さくの対象となる未固結層の場合、坑径が拡大する部分は比較的軟弱な粘土質の地層であるため、坑径拡大による検層応答の縮小率を上廻る大きな自然放射線強度を発生し、よく締った砂・礫の層の場合はこの逆の傾向を示すことになる。なお一般に、帯水層として選ばれる部分は、粘土含有率の小さい砂・礫の層なので、ガンマ線検層応答率も小さく、したがって、この部分のケーシングに孔明されたスクリーンにより影響される率はさらに小さくなり無視できる。

電気比抵抗検層 比抵抗検層の場合は、密度検層とは逆に、坑径の増大でみかけ比抵抗を減じる傾向のあることがこれまでの研究でわかっている。山形県川西の柱状図(第3図)もその相関性を比較的よく表わしている。いま、深度4-176 m間の $R_0 - D_0$ 相関は第21図のようになり、その相関係数 r は、0.51になった。密度検層の場合と同様に、比抵抗検層曲線の振幅の大小が、坑径の大小にだけ影響されるのではなくて、掘さく技術上、坑径の拡大しやすい部分はおもに粘土質の部分であり、この部分固有の比抵抗が比較的低いのを坑径の拡大がさ

らに助長させ値を縮小させるということである。

6. グラベルパッキングの安定性について

密度検層の測定機構上、検層応答は対象とする地層密度の他にグラベルパッキングの影響も受ける。そのため、水井戸完成間に施工するパッキング媒体物の経時的密度変化の状態の傾向をつかんでおくことは今後の検層解析上必要である。

それで、掘さく後1年3カ月を経過した山形県川西地点の水井戸で再度密度検層を行いパッキング媒体物の安定性について検討した。第6図にその結果を示す。深度42m以深で密度の顕著な相違のある箇所は、深度130mの近辺で一部認められる程度(点線の検層曲線で、深度160m以深坑底までの間の密度が異常に低値を示しているのは、年月の経過による坑内沈殿物の影響によるもので真の密度値を示していない)で、全体的にみれば、水井戸完工直後からの経時的安定性はわりあい良好であったといえる。しかし、深度32-42mの間の密度は当初1.55 g/ccと見積られていたにもかかわらず、2回目の検層では1.67 g/ccと変化してきている。ここは局部的に自然圧密による変化を受けた部分と考えられる。このような現象は深度が小さいほど起りやすい。そしてまた、パッキング材の自重による沈殿圧力が小さいので、施工直後からの安定した充填状態になりにくいことが容易に想像される。したがって、水井戸完成後の短い経過期間内で行う密度検層の場合は、この点を充分留意する必要がある。

7. 高密度層用プローブによる試験結果について

砂礫層のような高密度部分の密度検層応答は、粘土層のような低密度部分のそれに比べて大幅に小さくなるので精度の低下をまねくほか、水井戸では厚いグラベルパッキングと鉄ケーシングによる放射線減衰率が追加されるので、このような層での解析が特に困難になる。この問題を解決するため、4.3(高密度検層解析のための対策)で詳述したように、検層プローブの指向性窓面積の縮小と、これに伴う線源の強化をはかり、これによる試験を伊勢崎地点井で実施し、拡散型プローブで実施した同地点での検層図と比較検討した。

線源と指向性窓の改良により、従来から設定しているレートメータの時定数と検層プローブの昇降速度に合せて比べた結果、応答信号の静的安定性は非常に高くなり、統計的誤差率の問題は解消された。そして、検層昇降時の2度の応答の値差も減少して改善された。しかし、他地点における低密度層中の同様な検層応答の値差

に比べるとまだ多小大きい。これは次のような2つの理由によるものと考える。

1) 伊勢崎地点の地下地質は砂・礫の層がほぼ連続的に賦存している。粘土分はこの層中部分的に少量含まれる程度なので、検層応答は高密度を示す低計数率側の狭小な幅の範囲内に偏る。このように、地層変化による検層応答の幅が小さいので、相対的な誤差率は必然的に大きくなる。

2) この地点中に賦存する礫層は比較的粒径の大きい礫を多く混在するため、坑壁方位の相違による密度の均一性が薄いことと、これへの検層操作技術上のプローブ昇降時の2度のトレースが必ずしも同じ方位をたどらないことが原因と考えられる。

一般に、坑径の拡大部分の密度検層応答は5.1(密度検層)で述べたように、裸坑検層の場合は増大傾向を示すだけであるが、ケーシング挿入とグラベルパッキングの充填後に実施する検層—いわゆる水井戸検層の場合はその事情をかなり複雑化している。すなわち、坑径の拡大部分はそれだけグラベルパッキングの厚さが増す結果となり、地層中を放射線が散乱して地層自体の密度を表現する真の応答変化を鈍らせる結果となる。

今回改良したプローブは、地層中を透過・散乱した放射線をできるだけ大きな割合で検出できるように工夫しているものの、限られたプローブ径範囲内での放射線遮へい、加えて、裸坑中よりも後方散乱率が大きいケーシング坑中での検層では、グラベルパッキング充填厚さに影響される応答率は依然かなりの割合を占める。この割合は、地層密度や坑径などの条件の相違により相違し、今回の試験でも約40%を占めている(井戸掘さくの技術上、坑内に挿入される鉄ケーシングが途中で偏心している場合もあるが、この場合のグラベルパッキング厚さの変動も応答のバラツキの原因となりうる)。したがって、検層応答は、グラベルパッキングの容積密度よりも地層自体の容積密度の方が小さいとき小さくなり、逆にグラベルパッキングの容積密度よりも地層のそれが大きいとき大きくなる。しかしその地層密度差による応答差は縮小され、応答差と密度差の相関図作成による較正曲線勾配はゆるくなる。

第7図は、伊勢崎地点において、(1)昭和50年に実施した10m C_4 の ^{137}Cs 線源使用による密度検層(点線で示した曲線)。そして2年後の昭和52年に10m C_4 の ^{137}Cs 線源を使用して、(2)上記と同じ井戸中、ならびに(3)約1km南方に位置する水井戸中、で実施した各密度検層の応答を並記している。

(1)と(2)の応答を比べると、深度16mと21mの箇所

②の大線源の応答が異常に大きい。この状態は、前節(6.グラベルパッキングの安定性について)の深度32-42mの特異な部分と比べるとちょうど逆の状況である。それは、プローブの改良により粘土層部分の検出効率を増大させたこともあるが、その他の理由として、パッキング材の礫が自然圧密により沈下し、低密度の坑壁崩壊層に置き換えられたものと推測される。とにかく、前節でも触れたように、上部層では掘さく工事に関係するガイド管の挿入とその後の引き抜きによる坑壁の拡大ならびに不安定な荒れ、水位変動に伴う地層中の水浸透率の変化などの要因が加わって経時的にみて多様な変化が一般にあることを推測しながら解析する必要があることを示している。

上述の上部層以外の各深度点中、①で認められる応答ピークが②で認められない部分、いわゆる応答に大きな違いのある部分は、高密度層を検層することにより生じた①の統計的誤差が主因であり、(1)と(2)の間で応答ピークが一致する箇所だけが粘土やこれに準じた低密度の薄層部分であるといえる。

なお、③井は、上述の試験井から約1km離れていて、地質層準とその深度が類似し、グラベルパッキング状態が異なる場合の比較データとして意味をもつが、他の補助的情報が不充分なため、ここでは単に参考として並記するにとどめる。

高密度層を貫入した水井戸において、これまで試験に用いてきた弱線源・拡散型窓のプローブによる密度検層応答からは正確な物理的情報を与えていないのではないかと—との想定の下に、本節では、強線源・ビーム型の指向性窓を有するプローブを試験的に製作し、これにより再度検層を行い、従来型プローブによる検層応答との比較検討を行った。

この結果、ビーム型プローブによっても後方散乱率、および巨礫分布またはグラベルパッキング厚の不均一による影響を、当初予想したほど縮小できなかった。したがって、ビーム型プローブの使用により、応答信号の静的安定性の向上と、これによる統計的誤差を縮小させたことによる粘土層部位の一層の鮮明化をなし得たという効果を得るにとどまった。

今後この問題はさらに深く追求する必要があるが、現状では水井戸中の高密度部分に対して特にビーム型プローブを使用しないでも、これまで使用してきている拡散型窓のプローブにより、大時定数とこれにみあう遅い昇降速度で検層を行うことにより遜色のない結果が得られるものと考えられる。

8. 各試験地点の地層の物理的性質

8.1 全体の密度範囲について

各試験地点の水井戸(ケーシング挿入井)中における密度検層は、線源・検出部間の距離間隔を50cmと40cmの2条件で実施している。グラベルパッキングの状態とその他の坑井条件が特に異常な部分を除き、そしてまた時期的に最初に検層試験を実施した箇所(川西地点)の検層応答を基準にして、その後の検層試験の応答は各経過年月による放射線源の自然減衰の補正を行い、その値(単位は Kilo count per min.)を大間隔(50cm)と小間隔(40cm)のデバイスの両対数グラフ上にプロットした。さらに、昭和48年度に試験した静岡県中遠地区での容積密度と応答率と関係を同様な減衰補正をして今回の応答計数にあてはめると第22図のようになる。大・小両間隔のデバイスによる各応答の相関係数では0.9前後である。

各試験地点別の密度範囲は、

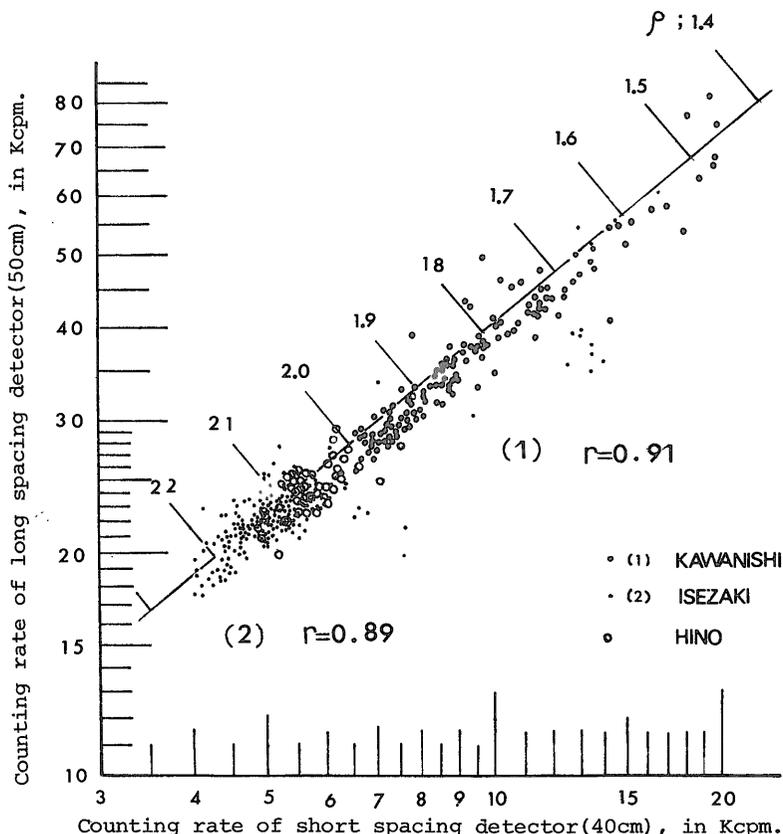
1) 川西地点——砂・礫の層が少なく、粘土や泥炭など比較的軟らかい地層が厚く堆積しているため、容積密度は1.50-2.00 g/ccの範囲にあり、1.95 g/cc前後の部分が最も多い。

2) 伊勢崎地点——砂・礫の層が連続しているため、全体に容積密度が大きく、2.05-2.25 g/ccの範囲にあり、そのうち2.12 g/cc前後の部分が多い。

3) 山梨市日野地点——この容積密度は、先の2地点の中間的な値の範囲にある。すなわち、第22図上に応答値を載せると川西地点の応答集団に接し、伊勢崎地点の応答集団の約半分に重なり合うかたちの集団となり、容積密度は2.00-2.15 g/ccの範囲にあり、2.08 g/ccの部分が多い。

8.2 地域的特徴について

1) 川西地点——深度が大きくなるほど、地質的に類似なものも固結度が大きくなる傾向があるが、大別し



第22図 線源・検出部間距離を長短に変えて試験した密度検層応答間の相関と密度範囲
Correlation between responses of long and short-spacing detectors.

て、砂・礫の層の容積密度は 1.95-2.00 g/cc, 粘土が主体の層は 1.80-1.95 g/cc, そして泥炭層は 1.70-1.85 g/cc である。ここでは、砂・礫の層でも容積密度が比較的小さく、後頁に出てくる間隙率と透水性の関係を示す図 (第26図) から推測される透水性は良好なものとはいえない。

2) 伊勢崎地点——ここは深度300mの範囲中、119.5-127mの間に比較的厚い粘土層が賦存し、その他では点的に粘土薄層を含むが、全体的にほとんど砂礫層の連続とみてよい。したがって、1)と同様に推測した透水性は、顕著な含粘土の部分を除いてほとんど良好な帯水層となりうる。この地点の粘土層の容積密度は、砂礫層の部分に比べてやや小さい 2.1 g/cc 前後である。

3) 山梨市日野地点——この地点の粘土層は、坑底近辺に2層あるが、これらの容積密度は 2.00-2.05 g/cc であり、この2層の粘土に挟まれた砂層は、2.05 g/cc 前後、そしてこれら以外はほとんど容積密度 2.07-2.10 g/cc の範囲にある砂礫層であるが、ちょうどストレーナー下部にあたる1箇所 (深度 74-77 m) で、容積密度が比較的大きい ($\rho = 2.15$ g/cc)。したがって、透水性は深度 82mまで全体的に良好であると推定されるが、前述の容積密度の大きい 74-77m 深度部分は特に優れていて、前述の間隙率と透水性の関係図 (第26図) から、 1×10^{-1} cm/sec 前後の透水係数を示すものとみられる。

9. 未固結帯水層のクロスプロット解析技術

クロスプロット解析技術—この技術は、異なる複数の検層曲線の値を縦・横両軸にそれぞれクロスプロットし解析する技術のことである。これには相関図的な分析ももちろん含まれるが、主目的はむしろ相関から逸脱した分布点など、その間に表わされた特異なパターンが地質的、物理的、そして深度的に何を意味しているかを解析しようとするものである。

帯水層の評価に最も重要な物理定数である透水係数は、わずかな粘土の混入によりその性質を著しく小さくする。それで、粘土分の精密な見積りは有効間隙率の正確な見積りとならんで重要視される。

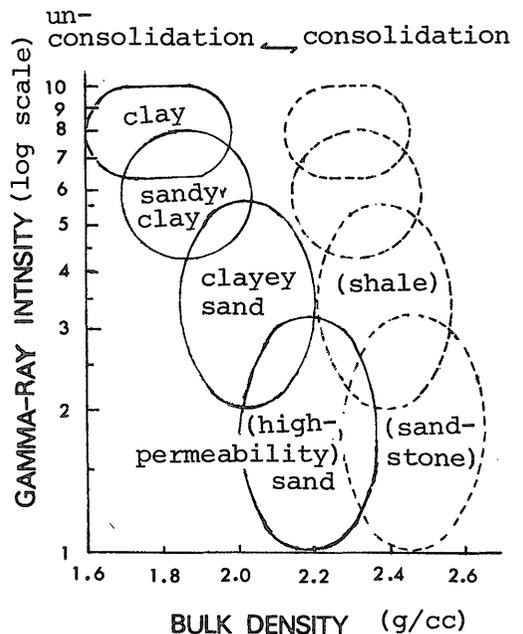
同時的に実施した複数種類の検層のデータを組合せたクロスプロット図からの透水係数の算定は、その地域の特徴を考慮しながら、土質工学で確立されている実験式の理論を帯水層中の粘土分にまで拡張 (帯水層は比較的に粘土分が少ないので、土質試験のための試料は崩壊するため採取不能) し、これと検層から知られる間隙率などの物理変数間の関係付けにより可能である。しかし、油層工学から発展してきたこのクロスプロット解析技術

の水井戸分野 (未固結層) への応用は、まだ初期の段階にあり、今後の研究に待つところが大きい。

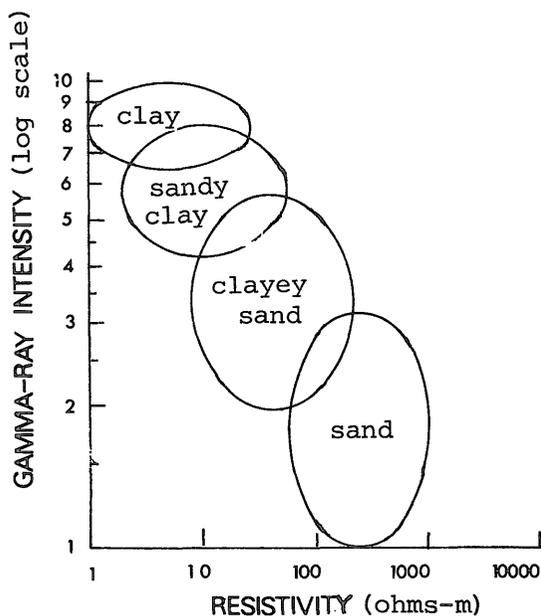
9.1 水井戸検層のクロスプロットの概念について

経済性を考慮した水井戸検層のクロスプロット解析のために適する検層項目としては、密度、ガンマ線、比抵抗、そして SP の最低4項目の検層が考えられ、これから6通りの組合せができる。しかしこの組合せはそれぞれ現段階では概念的にだけみていても未だ多くの不明な点をもっている。例えば、ガンマ線と SP のクロスプロットからは、 SP 応答大、ガンマ線応答小のところは透水性良好部分となる傾向を示すが、具体的に条件の相違により生じる各変数の処理をどうするかが未だ明確でない。とりあえずここに、ガンマ線と密度、そしてガンマ線と比抵抗の2つのクロスプロット解析のための一般的概念図を示す。

第23図と第24図は、砂または砂岩の構成鉱物が石英だけで重鉱物を含まない場合、ガンマ線と密度間、ならびにガンマ線と比抵抗間の各地層性質区分の概念的関係範囲を表わしたものである。なお、シルト分が混入する場合は、放射線強度と容積密度の両方とも、粘土と砂の中間の性質を一般に示すものと考えられ、それだけ複雑化するが、実際には1井当りで遭遇する地質の種類は、概念図中の全範囲のうち数箇所程度の分散状ブロック中にプロット点が偏向・集中するので、解析上の困難性は減



第23図 GR-D クロスプロット図の概念
Concept of GR-D cross-plot.



第24図 GR-Rクロスプロット図の概念
Concept of GR-R cross-plot.

少するはずである。

ガンマ線—密度クロスプロットの概念図(第23図)中の点線内は多くの場合、おもに欧米における油層解析の対象となる地層範囲としての固結または半固結層の範囲であって(注; 図中の shale とは、0.04 mmφ 以下のシルト・粘土により包まれた砂・礫の層と油層工学上定義されている), 未固結帯水層の場合はおもに実線の範囲内でプロットされる。なお、ガンマ線—比抵抗クロスプロットの概念図(第24図)からは、ガンマ線と比抵抗のクロスプロットだけによる固結・未固結の区別は困難と思われる。

9.2 密度検層と中性子検層間のクロスプロット解析について

油層工学において、密度と中性子²⁾、両検層間のクロスプロット解析技術は、両検層応答が粘土を含まない地層(石英砂を母体とする地層)でよく一致し、粘土分のある地層部分では相違するという特徴を利用して最近特に発達してきている。

検層応答は次の2つの式で表わされる。

$$\rho_b = (1 - \phi)\rho_{ma} + \phi[\phi_c\rho_c + (1 - \phi_c)\rho_f] \dots (1)$$

2) 中性子検層には熱、エピソード、中性子捕かく、パルス、そして放射化といった各種の中性子検層法があるが、水井戸用検層としての適合性を考えると、クロスプロット解析を行うのに正確な間隙率測定が最も重要な要求されるので、エピソード中性子検層が最適である。

$$\phi_N = \phi + V_c \cdot \phi_c \dots (2)$$

ここに、 ρ ; 密度(ただし、 ρ_b ; 容積密度)、 ϕ ; 有効間隙率(ただし、 ϕ_N ; 中性子検層で得られる間隙率)、 V ; 容量、その他の下付添字として、 ma ; マトリックス、 c ; 粘土分、 f ; 水分、をそれぞれ表わす。

このような2項目の検層応答ならびに式により、有効間隙率と粘土分を解くことができる。しかし、従来は一定した解析処理方法がなかったため、時間的な労費が多く、また客観性ある解釈がしにくいという問題があった。

KRUG and other (1976) はこの問題を解消するために、第25図に示したように、水浸透率を100%と仮定することにより、密度と中性子、両検層応答間のクロスプロット図を図形的に処理する方法を見出した。

おもに未固結堆積層を貫入する水井戸に用いる検層項目として、先に説明した4項目に加えて、さらに中性子検層を追加すべきかどうかについての議論は将来の問題として残しておき、ここでは研究的な意味で、KRUG and other (1976) による図形的処理法を紹介し、その後、筆者自身が未固結層の領域にまでこれを延伸発展させた部分載せる。

考えられる典型的な容積密度と中性子の結合の解釈は、第25図中の点としてグラフ上に示される。クロスプロットの三角形は、図示したように、粘土分と有効間隙率を比例的に区分する。ここに示した三角形の比例的原理を用いて、 ϕ と V_c は次式から計算できる。

$$\phi = a/L_1 \dots (3)$$

$$V_c = b/L_2 \dots (4)$$

式(3)と(4)の距離と長さを測って、有効間隙率と粘土分の線間の角度とクロスプロット三角形の辺が得られる。

三角形の辺の長さは;

$$\alpha = [(\rho_{ma} - \rho_f)^2 + (\phi_{Nf} - \phi_{Nma})^2]^{1/2} \dots (5)$$

$$\beta = [(\rho_c - \rho_f)^2 + (\phi_{Nf} - \phi_{Nc})^2]^{1/2} \dots (6)$$

$$\gamma = [(\rho_{ma} - \rho_c)^2 + (\phi_{Nc} - \phi_{Nma})^2]^{1/2} \dots (7)$$

有効間隙率と粘土分の線間の角 ω は、線分 α, β, γ の三角形の余弦定理から計算できる。

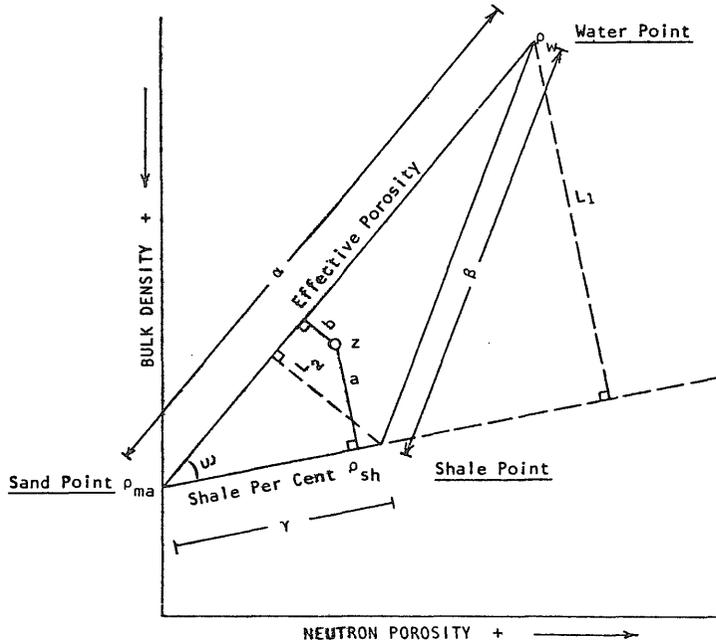
$$\cos \omega = (\alpha^2 - \beta^2 + \gamma^2)/2\gamma\alpha \dots (8)$$

L_1 と L_2 の長さは次のようになる。

$$L_1 = \alpha \sin \omega \dots (9), \quad L_2 = \gamma \sin \omega \dots (10)$$

L_1 と L_2 はもし三角形の制御点にずれが生じるならば、クロスプロット三角形の辺長の変化を反映させるために再計算しなければならない。

データ点から粘土分と有効間隙率の両線までの垂直距離 a と b は次のようになる。



第25図 D-N クロスプロット図の幾何学 (Krug と Cox による)
Geometry of D - N cross-plot, after Krug and Cox, 1974.

$$a = \frac{\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_c}{\phi_{Nc} - \phi_{ma}}\right) \phi'_N - \rho'_b + \rho_{ma}}{\left[\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_c}{\phi_{Nc} - \phi_{ma}}\right)^2 + 1^2\right]^{1/2}} \dots\dots(11)$$

$$b = \frac{\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_f}{\phi_{Nf} - \phi_{Nma}}\right) \phi'_N - \rho'_b + \rho_{ma}}{\left[\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_f}{\phi_{Nf} - \phi_{Nma}}\right)^2 + 1^2\right]^{1/2}} \dots\dots(12)$$

ここに ϕ'_N は関係点での中性子検層応答, そして ρ'_b は関係点での密度検層応答である。

したがって, まず距離 a と b を求めることにより, 有効間隙率と粘土分は式(3)と(4)から計算できる。

いま実際に最も一般的な数値として, 液体密度 1.0 g/cc を ρ_f に, 石英砂の粒子密度 2.65 g/cc を ρ_{ma} に, そして普通粘土の主成分であるカオリナイトとモンモリロナイトの粒子密度 2.60 g/cc を ρ_c に, それぞれあてはめ, さらに, 第25図の図形上から, $\phi_{Nf} = 1.0$, $\phi_{Nc} = 0.5$, $\phi_{Nma} = 0$ を仮定する。

クロスプロット三角形の辺長を式(5), (6)と(7)で計算すると,

$$\alpha = 1.929, \beta = 1.676, \gamma = 0.503 \text{ となる。}$$

有効間隙率と粘土分間の角度は, 式(8)から $\omega = 53^\circ 05'$ である。

長さ L_1 と L_2 は, 式(9)と(10)から次のようになる。

$$L_1 = 1.542, \quad L_2 = 0.402$$

有効間隙率と粘土分の線から, あるデータ点 (ρ_b, ϕ_N) までの垂直距離は, 式(11)と(12)により計算する。

$$a = \frac{0.1\phi'_N + \rho'_b - 2.65}{1.005}, \quad b = \frac{1.65\phi'_N - \rho'_b + 2.65}{1.929} \dots\dots(13), (14)$$

ここで $\phi'_N = 0.29$ と仮定し, 有効間隙率と粘土分の線から任意のデータ点 (ρ_b, ϕ_N) までの垂直距離を式(13)と(14)を用いて計算すると, 次のようになる。

$$\phi_1 = \frac{2.62 - \rho_b}{1.550}, \quad V_{c1} = \frac{\rho_b - 2.19}{0.776} \dots\dots(15), (16)$$

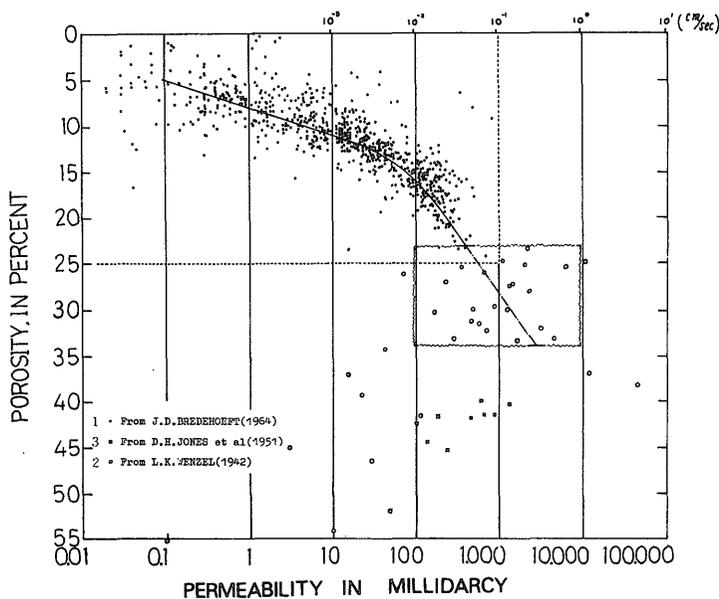
この結果は, 下記表中の下半分 $\rho \geq 2.20$ の範囲, いわゆる固結または半固結層の範囲での ϕ_1 と V_{c1} を示している。しかし, $\rho < 2.20$ での ϕ_2 と V_{c2} の値は別な考え方をする必要があり, 第26図 (小鯛, 1976) により説明する。

この図は, [1] BREDEHOEFT(1964), [2] WENZEL(1942), そして [3] JONES and other (1951) の3氏の間隙率と透水性に関する各図表をミリダルシーを単位に統一しまとめたものである。この図から, [2] の未固結帯水層中で透水性の良好な部分は固結性(砂岩)帯水層の関係曲線

Table 1. Effective porosity and the clay content on circumference of aquifer, calculated from the equations of (16) to (18).

	Bulk density ρ (g/cc)	Effective porosity, from Eq. (15) ϕ_1 (%)	Effective porosity, from Eq. (17) ϕ_2 (%)	Total porosity (ϕ_0) (%)	Clay content, from Eq. (16) V_{c-1} (%)	Clay content, from Eq. (18) V_{c-2} (%)
Conso- lidation Unconso- lidation	(1.80)	—	(0)	(50)	—	(50)
	2.10	—	19.4	(33.3)	—	11.6
	2.15	—	25.6	(30.3)	—	5.2
	2.20	27.1	—	(27.3)	1.3	—
	2.25	23.9	—	(24.2)	7.8	—
	2.30	20.7	—	(21.2)	14.2	—

The range of highpermeability



第26図 3氏の研究資料をまとめて作成した間隙率と透水性の関係 (小鯛, 1974)

Relation between porosity and permeability, obtained by combining the data of Bredehoeft, Wenzel, and Jones and other. (Kodai, 1974, in Japanese)

の延伸上にはほぼ載ることがわかる。この延伸上からはずれた部分は粘土分を含む難透水層である。この固結層と未固結層は透水性良好帯 (波線で囲った部分) を中心として、粘土含有による透水性減少が、間隙率に対して相反する方向に向うことが理解できよう。

$\rho_c = 2.60$, $\phi_{nc} = 0.5$ としたので, $\rho = (2.60 \times 0.5) + (1.00 \times 0.5) = 1.80$ g/cc となる。故に, $\rho = 1.80$ のとき, 有効間隙率が零になるものとして, 式(14)と(15)中の数値を入れ替えると, ϕ_2 , V_{c2} はそれぞれ次のようになる。

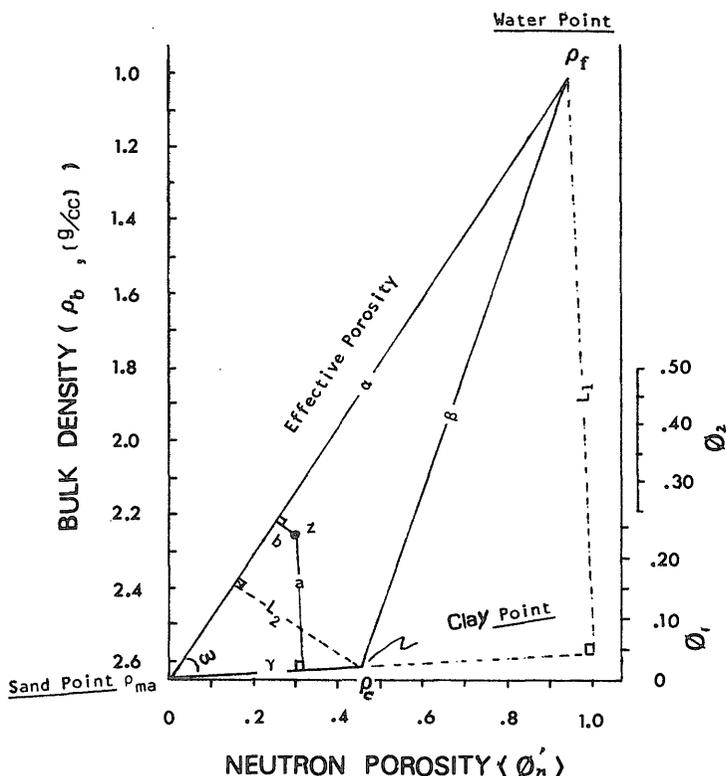
$$\phi_2 = \frac{\rho_b - 1.80}{1.550}, V_{c2} = \frac{2.19 - \rho_b}{0.776} \dots (17), (18)$$

この式中に $\rho < 2.20$ の各数値を代入し, 算出した数値を上記表中の上半分を示している。

この表と第27図から, 今回の変数値の仮定により得られる帯水層は, 容積密度 2.15-2.25 g/cc, および有効間隙率24%以上の範囲に絞られ, 仮定の妥当性を実証している。

9.3 将来への展望

以上述べた結果から, 粘土分と有効間隙率の $\rho_b - \phi_N$ クロスプロット解析は, 未固結帯水層を境にして, その前後で相違するので, 固結と未固結, 両方の式を用いるか, または目的によりそのどちらかを選ぶことが必要である。本研究はもちろん後者に強く関係している。とも



第27図 第25図をもとに発展させた未固結層における $D-N$ クロスプロットの詳細
Mechanism of $D-N$ cross-plot, made through figure 25.

1. From J. D. BREDEHOEFT (1964)
2. From D. H. JONES *et al.* (1951)
3. From L. K. WENZEL (1942)

あれ、ここに述べたように、油層工学におけるクロスプロット解析技術を未固結帯水層に適用しうることが判明した。

水井戸用検層である密度、ガンマ線、比抵抗、そして SP の各検層応答間におけるクロスプロット解析を行うための糸口として、まず $\rho_b - \phi_N$ クロスプロット解析技術の実際的な検討を行い、これとの関連性を追求することが今後の研究の主眼になるものと考えている。

文 献

GRANBERRY, R. J., JENKINS, R. E. and BUSH, D. C. (1968) Grain Density Values of Cores from some Gulf Coast Formations and their Importance in Formation Evaluation. *Soc. Prof. Well Log Analyst, 9th Ann. Logging Symposium, May 1968, Trans,*

p. N-1-N-19.

HESLOP, P. A. (1974) Gamma-Ray Log Response of Shaly Sand Stones. *Soc. Prof. Well Log Analyst, 15th Ann. Logging Symposium, May 1974, Trans, p. M-1-M-11.*

GUYOD, H. (1966) Interpretation of Electric and Gamma-Ray Logs in Water Wells. *Jour. of geology, vol. 1, p. 30-44.*

小鯛桂一 (1973) 帯水層に関する物理的情報について。応用地質, vol. 14, p. 153-158.

—— (1974 a) 地下水調査のための密度検層。地質調査所月報, vol. 25, p. 181-189.

—— (1974 b) 水井戸検層に関する研究(1)静岡県中遠地域。地質調査所月報, vol. 25, p. 559-568.

—— (1974 c) ケーシング挿入井での密度検層

- (I と II). 物理探鉱, vol. 27, p. 139-147.
- HILCHIE, D. W. (1968) Caliper Logging (Theory and Practice). *The Log Analyst*, vol. 4, no. 1, p. 3-11.
- KEYS, S. W. and MACCARY, L. M. (1971) Application of Borehole Geophysics to Water-Resources Investigations. *Techniques of water resources of the United States geological survey*, Book 2, Chapter-E1, p. 57-74.
- WAHL, J. S., TITTMAN, J., JOHNSTONE, C. W. and ALGER, R. P. (1964) The Dual Spacing Formation Density Log. *Jour. of Petrol. Tech.*, Dec. 1964, vol. 16, p. 1411.
- HEARST, J. R. and CARLSON, R. C. (1969) The RIDS: A Density Logging for Rough Holes. *Geophysics*, vol. 34, no. 2, p. 222-234.
- HEARST, J. R. (1976) Effects of Mudcake and a Simple Two-Detector Density Sonde. *The Log Analyst*, vol. 17, no. 3, p. 11-15.
- HYMAN, S. C., MINUSHIKIN, B. and CERTAINE, J. (1955) How Drill-Hole Diameter Affects Affects Gamma-Ray Intensity. *Nucleonics*, vol. 13, no. 2, p. 49-50.
- CONNOLLY, E. T. (1974) Digital Log Analysis; Recognition and Treatment of Field Recording Errors. *Soc. Prof. Well Log Analyst, 15th Ann. Symposium, May 1974, Trans*, p. S·1-S·45.
- 小鯛桂一 (1975) 坑井物理検層による粒状帯水層の評価法. 日本地下水学会々誌, vol. 17, p. 84-94.
- KRUG, J. A. and COX, D. O. (1976) Shaly Sand Cross-Plot; A mathematical treatment. *The Log Analyst*, vol. 17, no. 4, p. 11-15.
- 小鯛桂一 (1977) 未固結帯水層のクロスプロット解析技術. 日本地下水学会々誌, vol. 19, p. 1-7.

(受付: 1977年5月18日; 受理: 1977年6月23日)