

帯水層解析技術の研究 (放射能検層)

小 鯛 桂 一*

KODAI, K. (1980) Crossplot analysis for aquifer materials. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 31 (11), p. 535-552.

Abstract: This paper shows mainly the preliminary result of crossplot analysis by the response data obtained from neutron-gamma logging and other nuclear loggings which were run by the intention of the previous work (KODAI, 1978).

As a result, it was not sufficient to evaluate a neutron-density crossplot analysis from the data obtained from neutron-gamma logging because the intensity of neutron source used was too small. However, it has an availability to use the neutron logging device.

Further advancement of the neutron-density crossplot analysis will be studied in future to know the permeability of the formation by fine response data obtaining through the development of a safe, cheap, and precise neutron logging device.

1. はじめに

本報告は前回の報告『帯水層評価のための放射能検層の研究』(地質調査所月報, vol. 29, 1978)に基づいて実施した $n-\gamma$ 中性子検層とその他の放射能検層から得た応答データによるクロスプロット解析の中間的結果を示す。

報告書をまとめるにあたり松野環境地質部長並びに黒田水資源課長に御教示を得た他, 所査読委員からの御指摘により従来から慣用していた密度単位 g/cc (gram per cubic centimeter) を, 現在国際的にすすめられている国際単位系 SI で使用している g/cm^3 に書き改めた。なお, 文中で 1, 2 度用いた放射能単位 mCi (milli Curie) も SI では毎分当りの放射能壊変数 dpm (decay per minute) であるベクレル Bq に統一している。すなわち, 1 mCi は $3.7 \times 10^7 \text{Bq}$ (=dpm) となる。

2. 帯水層解析のための中性子検層機

2.1 中性子検層の必要性

おもに経済的見地から, 地下水調査目的に用いる検層項目としては, 電気検層であるノルマル比抵抗検層と自然電位検層の他に, 核反応を利用する放射能検層中のガンマ・ガンマ検層 (密度検層) とガンマ線検層 (自然放射能検層) の 2 つが挙げられる。これら合計 4 項目の検層を総称して水井戸検層と呼ぶこともある。

地層の透水性は地下水の賦存状態を知る上で最も関係

の深い係数の 1 つであるが, 検層から直接求めることはできないので, これを間接的に求めるため間隙率が測られる。透水性は間隙率と相関するが, 特に, 地層中に含まれる粘土自体の空隙を除く有効間隙率と高い相関性をもつ。すなわち, 間隙率から透水性を推測しようとする場合, 地層中の粘土分混入の有無及びその比率を認知しないかぎり正確に論じられない。したがって, 地下水調査目的の検層解析では地層中の粘土分と有効間隙率を解析評価することが最重要事項となる。この解析には複数の検層データに基づくクロスプロット手法が一般に用いられるが, 前述の 4 検層項目間の組合せについて既存資料をもとに検討した結果では, これら検層の性質上, 定量的な関係付けを得ることは無理であるという結論に達している (小鯛, 1978)

一方, 中性子検層と密度検層の両応答データによる解析 (中性子-密度クロスプロット解析) からは, 粘土分と有効間隙率を迅速かつ正確に算出できることが過去の多くの報告 (KRUG *et al.*, 1976; POUPON, 1970; RANSON, 1977) で知られている。中性子検層と密度検層を用いる理由はこの両検層が共に間隙率を算出できること, そしてこれらの検層応答が粘土分を含まない地層中でよく一致すること, 他方, 粘土分を含む地層中で中性子検層が粘土の吸着水に対しても一様に反応するのに, 密度検層の方は反応しないという特徴を利用するからである。

以上のように, 地層の透水性を知るための諸係数を求めるには, 同一井で実施した中性子検層と密度検層の両データを可能な限り多く集積し, 先ず中性子-密度クロス

* 環境地質部

プロット解析を行うこと。しかる後、密度検層以外の水井戸検層(ノルマル比抵抗、自然電位とガンマ線)のデータ間の関連を追求するのが妥当な手順であると考え。

2.2 中性子検層法について

単に中性子検層といってもその種類は多い。熱中性子 thermal neutron, 中性子-ガンマと熱外中性子 epi-thermal neutron の各検層法は密度検層が使われはじめた以前から使われていた。これらはいずれも放射性同位元素の中性子線源を用いる。

その後の技術的進展により、最近では中性子寿命検層を含むパルス中性子検層や放射化中性子検層といった新しい中性子検層法が、おもに油井を対象に開発され使用されている(第1表参照)。これらのうち中性子寿命検層は放射性同位元素線源の代りに電子の中性子発生装置を用いるため、被爆の危険性が少ない上、放射線測定システム上、坑井影響をあまり受けないので地層内流体の分析に理想的な機具とされている(Wu *et al.*, 1978; Youmans *et al.*, 1966)。それで、THIBIDEAU (1977) にみられるように、その装置性能に関する研究も活発である。しかし、この種の機器は機構的に複雑であり、その分、高価になるので石油探査目的以外は研究用として使用されるにとどまり、水井戸検層として汎用されるまでには至らない。

したがって今のところ、地下水調査のための中性子検層法としては、熱中性子、中性子-ガンマと熱外中性子の3法が挙げられる。熱中性子法は線源から放射される速中性子が元素と衝突して減速、熱化し熱中性子となる。そしてさらに、これが捕かく・吸収されることにより減衰する数的關係を測定する。これに対して、中性子-ガンマ法は線源から放射される熱中性子が元素に捕かく・吸収される際に発生するガンマ線の量を測定する。

このように、上記の2つの中性子検層法は、測定原理からみて熱中性子又はガンマ線のいずれを検出するかの相違はあるが、得られる情報は同じである。

中性子-ガンマ検層はもし対象物質中に塩素を含む場合、これの捕かく断面が他のそれに比べて数倍大きい(31.5バーン)のために高エネルギーのガンマ線を放出するので、波高分析することにより塩素量が検出できる。このことから、中性子-ガンマ線検層のことを別名“塩素検層”と呼ぶこともある。なお、塩水か淡水かの判別は上記の方法の他に、熱中性子-ガンマ法と後述する熱外中性子法の同時測定の数差から知る方法もある。

熱外中性子法は速度が鈍った熱中性子法を薄いカドミウム板などで遮へいして、これよりも高いエネルギーである熱外中性子だけに感じるようなしくみにしてあり、塩素とは無関係に、淡水で飽和した地層の間隙率だけを測定できるので、地下水調査目的には最適な方法であるといえる。

2.3 中性子線源の種類

中性子検層に用いる主要な中性子線源には、²²⁶Ra-Be, ²³⁹Pu-Be, ²¹⁰Pb-Be, ²⁴¹Am-Be, ²¹⁰Po-Be と ²⁵²Cf などがある。このうち、²²⁶Ra-Be 線源は中性子発生と共に、その数の約 10⁴ 倍も多いガンマ線を同時に発生するので、多目的利用の見地から油井のコンビネーション検層に多く用いられているが、一般にはガンマ線発生率が比較的到低く半減期の長い²⁴¹Am-Be 線源が多く用いられている。

2.4 中性子 - ガンマ検層用プローブの製作

本報告の主題である“放射能検層による帯水層解析技術の研究”のためには、2.1節で述べたように、その糸口として先ず中性子-密度クロスプロット解析を実施する必要がある。そのための中性子検層として、今回、中性子-ガンマ検層法を選び、そしてこのプローブを製作し試験した。地下水調査目的に最も適合する熱外中性子検層法でなくあえて中性子-ガンマ検層法を選んだ理由は、限られた予算で行ったため既存の類似機器の活用に依存したからである。すなわち、土木地質調査用の中性子水分計(耐水、耐圧とケーブル長の各面で浅層設計なので地下水

第1表 各種の中性子検層法
Various Neutron Logging Method

Method name	Energy		Detection	
	Isotope source	Generator	Neutron	Gamma-ray
Neutron-Gamma	○			○
Thermal Neutron	○		○	
Epi-thermal Neutron	○		○	
Pulsed Neutron		○	○	○
Neutron Activation	○	○	○	○

調査目的には不適) の中性子線源 ($^{241}\text{Am-Be}$; 30 mCi) の活用と密度検層用シンチレーション検出部の併用により中性子-ガンマ検層用プローブを所内で製作した。これには技術部特殊技術課・竹内三郎技官の協力を得た。

2.5 中性子 - ガンマ検層に関する物理

中性子と原子核との相互作用を定量的に表わすのに、捕かく・吸収といった断面単位を用いる。幾種類かの元素でつくられる地層物質の cm^3 当りの断面積又は巨視的断面積は、 1cm^3 の物質をつくる核断面積の合計である。これは次式で表わされる (BAKER, 1957)。

$$\Sigma_B = \sum_i n_i \sigma_i \quad (1)$$

ここに、 Σ_B は巨視的断面、 σ_i は i 型の核断面、そして n_i は $i/\text{cu cm}$ 型の核数である。もし、 N が構成物質により秒当りに吸収された中性子数ならば、元素 j で捕かくされた数は;

$$N_j = N \frac{n_j \sigma_j}{\Sigma_B} = N \frac{n_j \sigma_j}{\sum_i n_i \sigma_i} \quad (2)$$

元素部分で発生したガンマ線の強度は、元素の捕かく断面、及び元素に捕かくされた単位時間当りの中性子数に比例する。

物質の小試料中、秒当りの捕かく中性子数 N は;

$$N = \phi \Sigma_B \quad (3)$$

ここに、 ϕ は熱中性子束、そして Σ_B は上で定義した巨視的断面である。元素 j で捕かくした中性子数 N_j は;

$$N_j = \phi n_j \sigma_j = N \frac{n_j \sigma_j}{\Sigma_B} \quad (4)$$

元素により単位時間当りに産出したエネルギー E のガンマ線量子数 $I(E)$ は;

$$I(E) = N \frac{n_j \sigma_j}{\Sigma_B} P(E) \quad (5)$$

ここに、 $P(E)$ はこのガンマ線エネルギーに対する元素 j の照射確率である。

3. 最近の中性子 - 密度(N-D)クロスプロット解析技術理論とその検討

ある地域の地下水形態を調べるために実施する検層種類として何を選ぶべきか、そして得られたデータをどんな方法で解析すれば地下水に関係する重要な情報を、有効、明確、かつ迅速に得られるかといった問題の議論は上述した内容以外に、未固結性及び固結性の堆積物と各種検層との間の物理的概念の考え方を混えてすでに報告済みである (小鍋, 1978)。この中で、地下水調査のための検層解析技術を確立するためには、油層工学で研究が進んでいる N-D クロスプロット解析法を応用研究することが先決であるという結論に達している。

3.1 KRUG and COX (1976) による N-D クロスプロット解析法

中性子検層と密度検層、2つの検層応答は一般に次の2式で表わされる。

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

$$\phi_N = \phi + V_c \phi_c \quad (2)$$

ここに、 ρ ; 密度 (ただし、 ρ_b ; 密度検層で得られる容積密度)、 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、そして f ; 水分、をそれぞれ表わす。

KRUG and COX は第1図 a に示すように、最大水浸透率を100%と仮定することにより N と D の両検層データをクロスプロット図解処理する方法をみいだした。すなわち、示される三角形の比例原理を用いて、有効間隙率 (ϕ_1) と粘土分 (V_{c1}) は次式で計算できる。

$$\phi_1 = a/L_1 \quad (3)$$

$$V_{c1} = b/L_2 \quad (4)$$

三角形の辺長は

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

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

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

ϕ と V_c の線間の角 ω は、線分 α 、 β と γ の三角形余弦定理から計算できる。

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

L_1 と L_2 の両辺長は次式になる。

$$L_1 = \alpha \sin \omega \quad (9)$$

$$L_2 = \gamma \sin \omega \quad (10)$$

データ点 z から ϕ と V_c の両線までの垂直距離 a と b は次のようになる。

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

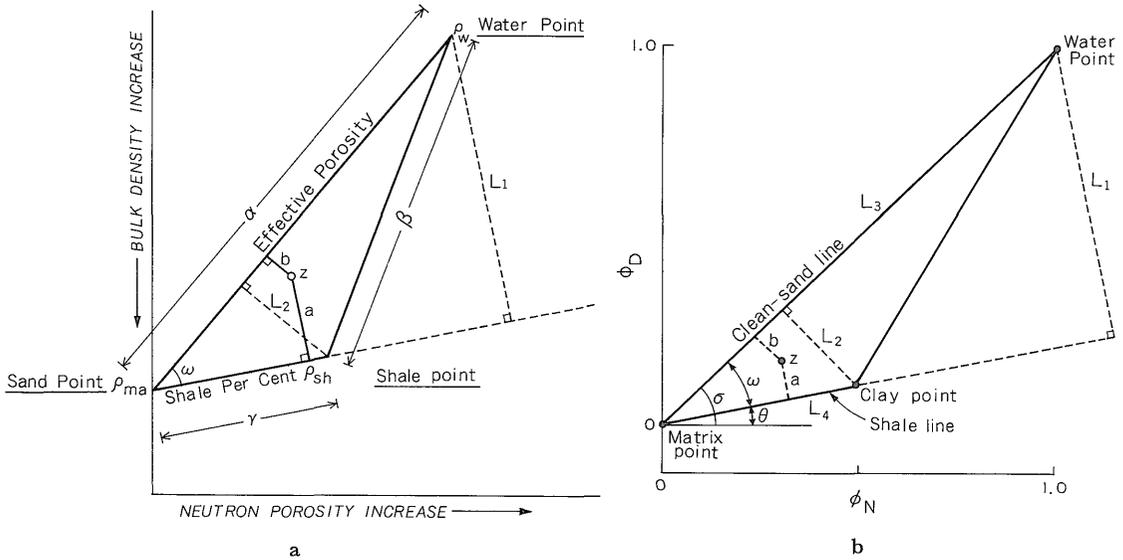
$$b = \frac{\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_f}{\phi_{ma} - \phi_{Nf}} \right) \phi'_N - \rho'_b + \rho_{ma}}{\left[\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_f}{\phi_{ma} - \phi_{Nf}} \right)^2 + 1^2 \right]^{1/2}} \quad (12)$$

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、 ϕ_1 と V_{c1} は式(3)と(4)から計算できる。

3.2 WU and KRUG (1978) による N-D クロスプロット解析法

WU and KRUG (1978) は、前述の KRUG and COX (1976) のクロスプロット解析図の縦軸を、密度検層から得た容積密度 (ρ_b) から $\phi_b = [(\rho_g - \rho_b) / (\rho_g - \rho_f)] \times 100$



第1図 密度-中性子クロスプロット図の幾何
Geometries of D-N crossplot.
a—after KRUG and Cox, 1976
b—after Wu and KRUG, 1978

%の間隙率式により全間隙率に変え、この目盛間隙を横軸(中性子検層から得た間隙率; ϕ_N)と一致させることにより次のような単純式に改良した。すなわち、第1図b中の θ , σ と ω は次式で説明できる。

$$\tan \theta = \phi_{DC} / \phi_{NC} \quad (1')$$

$$\theta = \tan^{-1} (\phi_{DC} / \phi_{NC}) \quad (2')$$

ここに、 ϕ_{DC} ; 密度検層から求めた粘土点の間隙率、 ϕ_{NC} ; 中性子検層から求めた粘土点の間隙率、そして ϕ_D と ϕ_N の最大は共に1なので $\theta = 45^\circ$ となる。故に、

$$\omega = 45^\circ - \theta \quad (3')$$

図中の各辺長 L_3 , L_2 と L_1 の各方程式は次のようになる。

$$L_3 = \sqrt{2} \quad (4')$$

$$L_1 = \sqrt{2} \sin \omega \quad (5')$$

$$L_2 = (\phi_{NC}^2 + \phi_{DC}^2)^{1/2} \sin \omega \quad (6')$$

もしデータ点が図中のz点で示されるならば、zから L_3 と L_4 までの垂直距離は次の2式で説明できる。

$$a = \frac{(\tan \theta) \phi_{NJ} - \phi_{DJ}}{(\tan^2 \theta + 1)^{1/2}} \quad (7')$$

$$b = \frac{(\tan 45^\circ) \phi_{NJ} - \phi_{DJ}}{(\tan^2 45^\circ + 1)^{1/2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_{NJ} - \phi_{DJ}) \quad (8')$$

ここに、 ϕ_{DJ} ; 密度検層によるj番目データの間隙率、そして ϕ_{NJ} ; 中性子検層によるj番目データの間隙率。

三角形の比例原理を利用するクロスプロット図形から求める有効間隙率(ϕ_{jcp})と粘土分(V_{c-scj})の各式は次の

ようになる。

$$\phi_{jcp} = a / L_1 \quad (9')$$

$$V_{c-jcp} = b / L_2 \quad (10')$$

3.3 両解析法の試算とその比較

1) まずKRUG and Coxの解法(3.1節)から ϕ_1 と V_{c1} を試算する。第1図aと同様に、 $\phi'_{NF} = 1.0$, $\phi_{nc} = 0.5$, そして $\phi_{ma} = 0$ とし、さらに ρ_f , ρ_{ma} , ρ_c (粘土点 ρ_c)に対して実際上最も一般的な数値である1.0, 2.65と2.60 g/cm³をそれぞれあてはめてみる(第2図参照)。

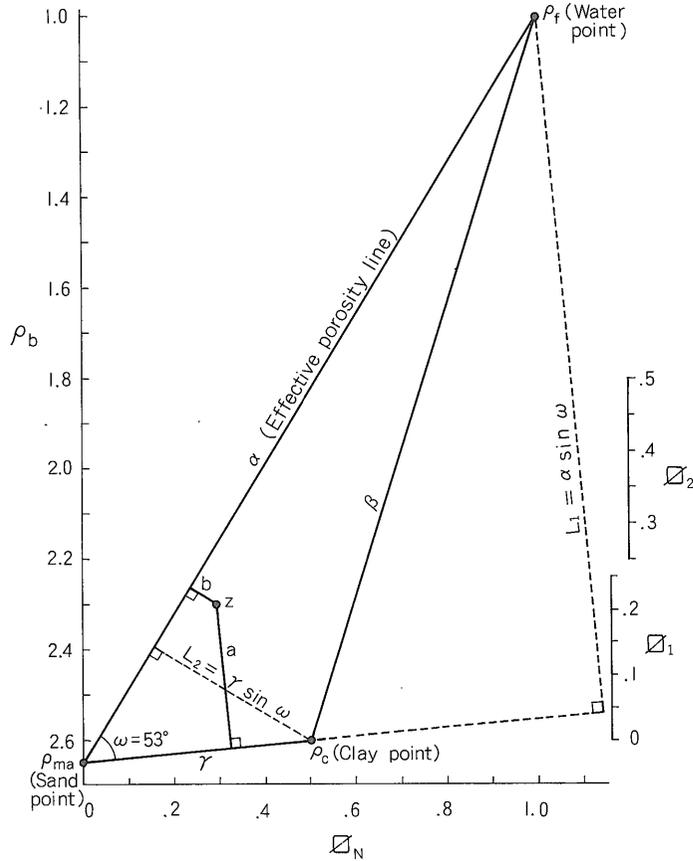
式(5), (6)と(7)に上記各変数値を代入してクロスプロット三角形の各辺長を計算し、これから式(8)により α 線(有効間隙率線)と γ 線(粘土分線)間の角度を求める。この角度と式(9)と(10)から、 L_1 と L_2 の各辺長を求める。さらに式(11)と(12)を用いてあるデータ点z(ρ'_b , ρ'_N)から α 線と γ 線までの垂直距離aとbを求めることができる。ここでいま、 $\phi'_N = 0.3$ とした場合の最終式は次のようになる。

$$\phi = (2.62 - \rho_b) / 1.616, \text{ そして}$$

$$V_{c1} = (2.155 - \rho_b) / -0.651$$

1.80, 2.10, 2.15, 2.20, 2.25 と 2.30 g/cm³の各容積密度(ρ_b)に対する有効間隙率(ϕ_1)と粘土分(V_{c1})の各値は第2表中に示される。

1) 粘土点については、後節3.4で詳細な議論をしているのでこれを参照されたい。



第2図 第1図 a から導いた密度-中性子クロスプロット目盛
Mechanism of D-N crossplot, made through figure 1-a.

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

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

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

ii) 次に Wu and Krug の解法 (3.2節) から、 ϕ_{JCP} と V_{c-JCP} を試算してみる。両方式の比較を容易にするため、i) の試算時に設定した値と同じ各変数値を用いる。すなわち、 $\rho_f = 1.0$, $\rho_{ma} = 2.65$, $\rho_c = 2.60$, $\phi_{Nf} = 1.0$, $\phi_{Nc} = 0.5$, そして $\phi_{ma} = 0$ 。

式(1')と(2')から θ が求まり、 $\phi_{Nf} = \phi_{Df} = 1$ なので、式(3')から ω が求まる。故に式(5')と(6')から L_1 と L_2 の各辺長が求まる。また、 ϕ_N と ϕ_D の両軸は直角なので $L_3 = \sqrt{2}$ である (第3図)。いま ϕ'_N 値を i) の試算に用いた値と同じ 0.3 とし、これを (7') と (8') 式に代入すると、式(9')と(10')は最終的に次のようになる。

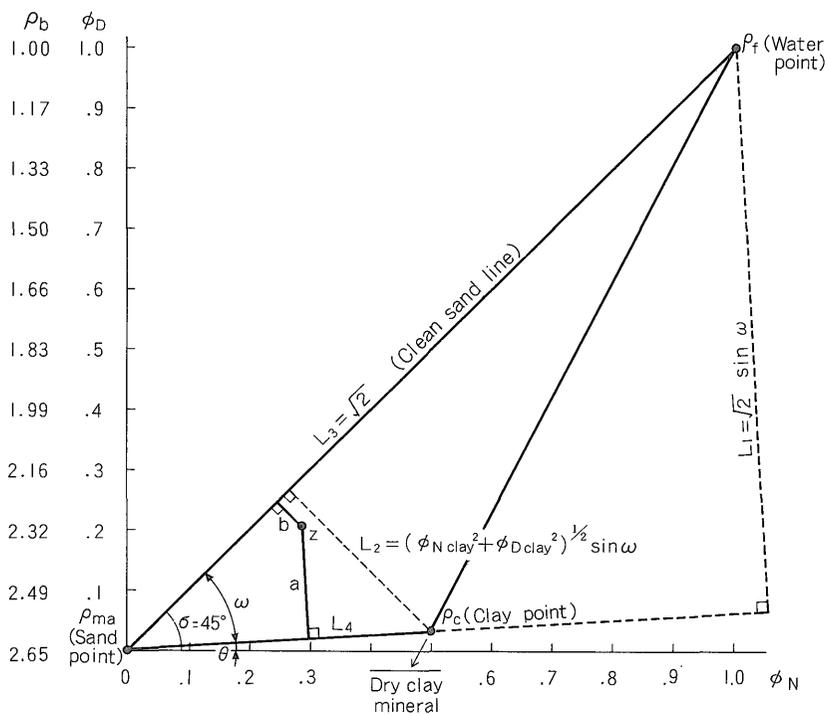
$$\phi_{JCP} = (0.018 - \phi_{DJ}) / -0.939, \text{ そして } V_{c-JCP} = (0.3 - \phi_{DJ}) / 0.469$$

そしてまた、i) の場合と同じ 1.80, 2.10, 2.15, 2.20,

2.25 と 2.30g/cm³ の各容積密度 (ρ_b) を全間隙率に変換した値に対する ϕ_{JCP} (有効間隙率) と V_{c-JCP} (粘土分) の各値はそれぞれ第2表中に、i) からの算出結果と共に示される。

3.4 試算結果の検討

ここに、既報 (小鯛, 1978) 中に示した間隙率と透水性の関係図を第4図として再度掲載することにする。第4図は BREDEHOEFT (1964), WENZEL (1942) と JONES *et al.* (1951) の3者の間隙率と透水性に関する各図表をミリダルシー単位に統一し、まとめたものである。図中、固結堆積層の場合、間隙率増大で透水性増大の比例関係があるのに対して、未固結堆積層では粘土分増大による間隙率増大がそのまま有効間隙率増大につながらず、むしろ透水性は減少する傾向にある。そして固結及び未固結の両層の曲線は、その交点周辺の間隙率を軸に



第 3 図 第 1 図 b から導いた密度-中性子クロスプロット目盛
Mechanism of D-N crossplot, made through figure 1-b.

$$a = \frac{(\tan \theta) \phi_{NJ} - \phi_{DJ}}{(\tan^2 \theta + 1)^{1/2}}, \quad b = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_{NJ} - \phi_{DJ})$$

第 2 表 2 つの図的解法による間隙率と粘土分の比較

Comparison with porosity and clay content values obtained from the two kind's geometries, when $\phi'_N = 0.29$.

Bulk density ρ_b g/cm ³	Total porosity ϕ_{DJ} %	Effective porosity		Clay content	
		from Krug's Eq. ϕ_1 %	from Wu's Eq. ϕ_{jcp} %	from Krug's Eq. V_{c-1} %	from Wu's Eq. V_{c-jcp} %
1.80	51.5	(50.7)	(52.9)	(-) 54.5	(-) 45.8
2.10	33.3	(32.2)	(33.5)	(-) 8.4	(-) 7.0
2.15	30.3	(29.1)	(30.4)	(-) 0.8	(-) 0.6
2.20	27.3	26.0	27.2	6.9	5.8
2.25	24.2	22.9	23.9	14.6	12.4
2.30	21.2	19.8	20.7	22.3	18.8

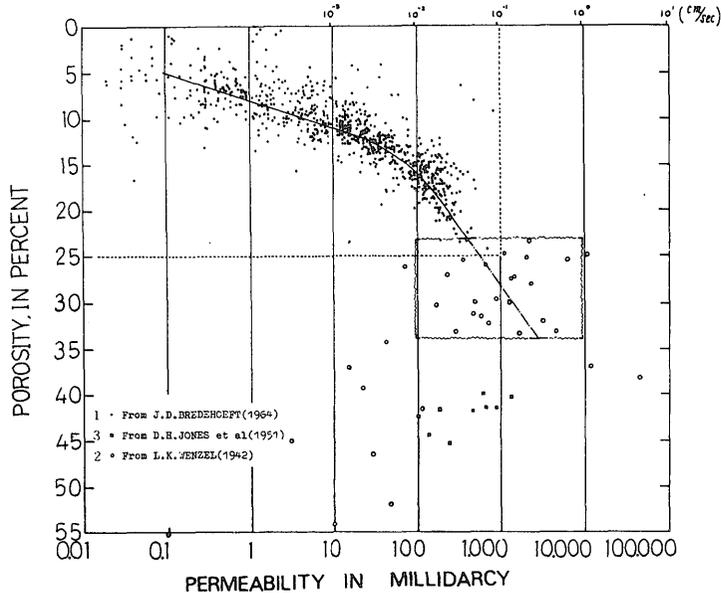
ほぼ対称な性状を描がく。この交点周囲の間隙率に相当する容積密度 (ρ_b) がほぼ 2.15-2.20 g/cm³ の範囲にあると推察された。

以上の理由から、既報 (小鯛, 1978) では ρ_b が上記の値 (2.15-2.20 g/cm³) 以下の場合、CRUG らの式をそのまま適用できないとして、 ϕ_1 の改良式 ϕ_2 式を別に考案

した。すなわち、有効間隙率 ϕ_1 において、 $\rho = 2.60$, $\phi_N = 0.5$ の設定により $\rho = 2.60 \times 0.5 = 1.80$ g/cm³ となるので、 $\rho_b = 1.80$ とおき、このとき有効間隙率が 0 になるものとして次式を工夫した。

$$\phi_2 = (\rho_b - 1.80) / 1.616$$

このように、粘土点 (ρ_c) を 2.60 と設定することにより



第4図 3氏の研究資料より作成した間隙率と透水性の関係
Relation between porosity and permeability, obtained by combining the data of BREDEHOEFT, WENZEL, JONES and other (KODAI, 1974).

容積密度の境界は1.80となった。この ρ_c 値設定の根拠は、カオリナイトやモンモリロナイトを主成分とする普通粘土の乾燥粒子密度に近似させたことにある。しかし広汎な考え方をすれば、例えばドロマイトの乾燥粒子密度は石英砂のそれよりもずっと大きい2.85 g/cm³を示すといったぐあいに、もし真の乾燥粘土鉱物の密度をさがすとすれば、これはクロスプロット図形中の $\rho_f - \rho_c$ 線を下方に延伸させたところのもっと大きな密度点になるであろう。したがって、2.60 g/cm³に設定した ρ_c 点は乾燥粘土層ではなくむしろ不透水性粘土層として一般に多く存在するところの、ある程度湿潤した粒子密度の点であると考えべきである。このような議論からして $\rho_b = 1.80$ のとき有効間隙率 $\phi_2 = 0$ とする前回報告での仮定は、粘土分増大で有効間隙率が減少するという大局では正しいが、正確さにおいて十分に満足しうるものではなく、今後若干の修正が必要であろう。

第2表において、KRUGらならびにWUら両者の式を、 $\phi'_N = 0.3$ として計算した有効間隙率は、 $[(\rho_g - \rho_b) / (\rho_g - \rho_f)] \times 100\%$ 式から算出した全間隙率と非常によく近似している。油層工学ではここでの ρ_b が2.20 g/cm³以上の領域のおもに固結層だけを対象にしていて、この場合、全間隙率は有効間隙率と等しいものとみなすことができる。他方、粘度分は ρ_b が2.15以下で負符号となる。これをクロスプロット図形での単なる作図上の符号

転換として無視すれば粘土分は2.15近辺で最小になり、最も透水性が良い部分に相当するものと云える。そして、この近辺領域を固結層と未固結層の境界であるとしてさしつかえなからう。したがって、残る問題は未固結層範囲の有効間隙率を正確にどう算定するかにしぼられる。今後、この領域の有効間隙率を正確に求めるために、諸条件を十分に満す経験式を確立しなければならない。その第1段階としてなるべく多くのデータを集積することが要求される。

4. 実際検層データの解析

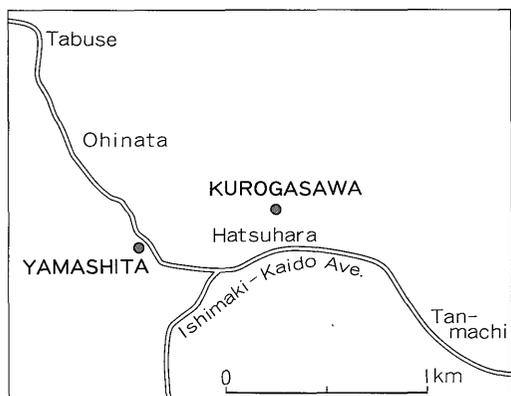
本節では放射能検層を含む複合検層(2項目以上の検層を同一井で実施することをいう)の有効性と、これまで軽視されがちであったガンマ線検層(自然放射能検層)を再認識する意味での“効果”について述べる。

4.1 密度検層とガンマ線検層

4.1.1 松島地区

宮城県宮城郡松島町内の山下地点とそのNEN方向に約600m離れた黒沢地点にある井戸で放射能検層を実施した(第5図a)。

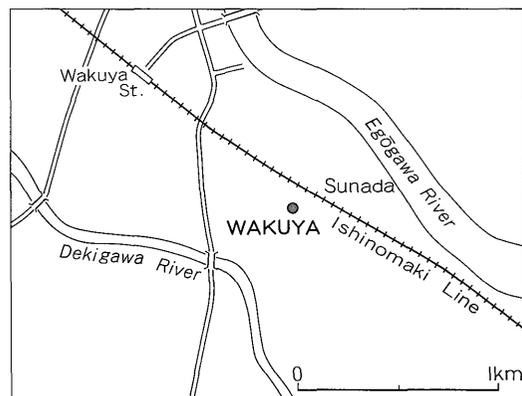
この周辺の地質は表層から直接第三系が横たわる。しかし上記2井の掘さく柱状図を比べると大きな差異がある。それはこれら各井戸が別会社により掘さく・開発されたために生じた技術ならびに用語の差によるものであ



a



b



c

第5図 松島、矢吹と涌谷の各検層実施地点
Location maps of logging spots.
a—in Matsushima, Miyagi Pref.
b—in Yabuki, Fukushima Pref.
c—in Wakuya, Miyagi Pref.

ることが放射能検層の解析結果から判明した。すなわち、2井間で得られた密度検層図とガンマ線検層図を重ね合せ、深度的に相関性の高いとみられる位置まで上下方向にずらす(これを“重ね合せ手法”と呼ぶ)と第6図aのようなになる。これらの各相関係数(r)は密度検層応答が0.84, そしてガンマ線検層応答が0.79(ただし深度90m前後のピーク部分は放射性鉱物による異常ピークとみられるので、ここでは除外した)となりかなり高い相関を示している。したがって、第7図中の鎖線で示すような成層関係を結ぶことが可能と考える。

この2検層図間の成層結線の傾斜は、この付近の地層の一般走向がNE-NN方向でNW方向に傾斜しているので地質学的に合致する。したがって、2つの柱状図中の地層名記載の食い違い部分は次の2つの理由により生じたものと判断される。

- (i) 地質鑑定用スライム試料の採取法に技術的問題があること。
- (ii) 各鑑定者に個人差があること。

第8図に示したガンマ線-密度(GR-D)クロスプロット図から、山下井と黒沢井を結ぶ周辺において最も良好な透水性を示すとみられる部分は山下井の38-59mと黒沢井の26-41mの各区間である。その他に、これに準じて透水性がよいとみられる部分はそれぞれ2カ所ずつ推定される。これらは第3表のようにまとめられる。

4.1.2 矢吹地区

福島県矢吹町内にある同町所有の水道水源井、6号井と7号井において放射能検層を実施した。この両井は位置図(第5図b)に示すように約600mの距離がある。

(i) 6号井

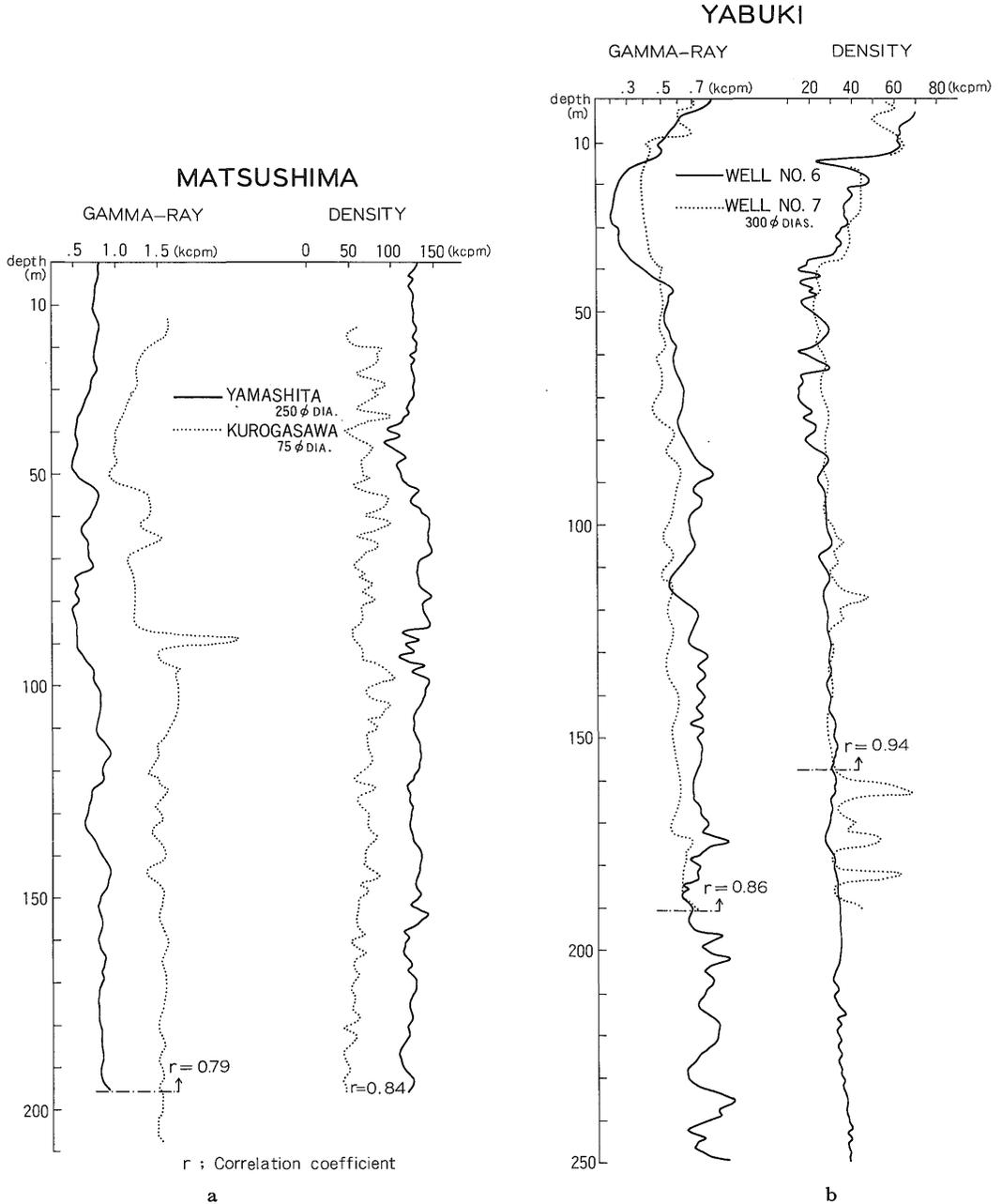
検層結果から、深度16-37m間の安山岩質溶結凝灰岩層は自然放射線強度と容積密度が共に小さいという特徴がある(第9図)。また、全体的にみて深度が増すほど容積密度が小さくなるとともに自然放射線強度も大きくなる。これは粘土分の増大を意味する。GR-Dクロスプロット図(第10図a)からは透水性の最も良好な部分は深度37-73m間であると推論される。

(ii) 7号井

第3表 山下井と黒沢井の各帯水層深度

Each aquifer of Yamashita and Kurogasawa well points, Miyagi Prefecture.

	Main aquifer	Sub-aquifer
Yamashita well	38-59m	86-97 and 120-137m
Kurogasawa well	26-41m	73-82 and 105-116m

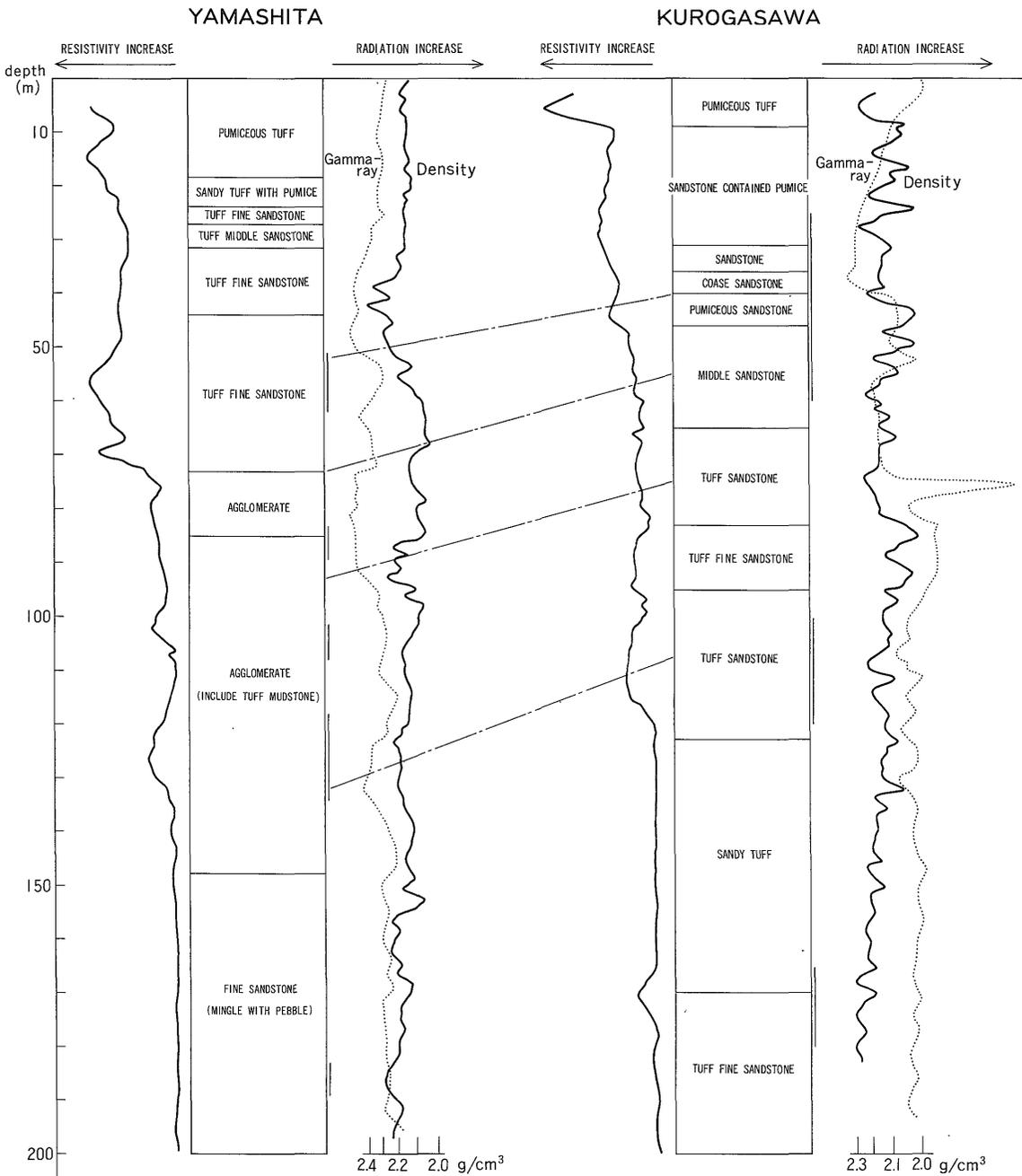


第6図 2井間の放射能検層応答の相関性
Log correlation between two wells, gamma-ray and density logs.

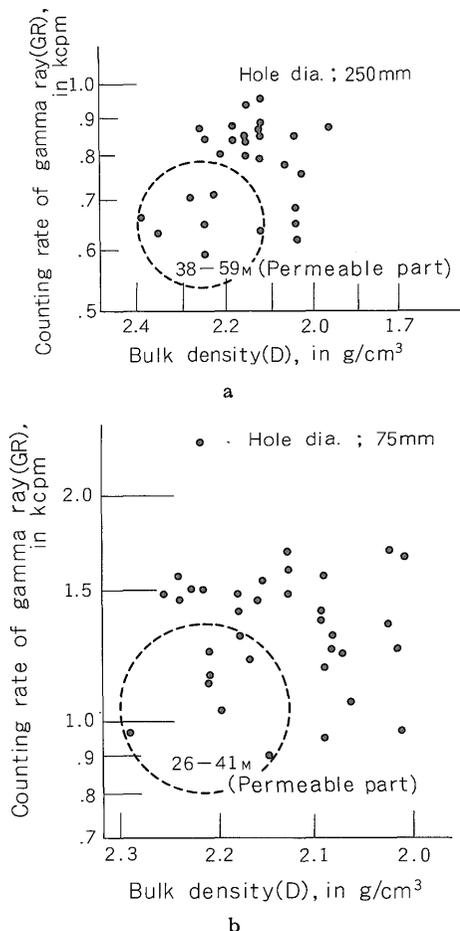
6号井と7号井で得られた各放射能検層は、松島地区での検層解析と同様に重ね合せ法の手続きを通して地層の物理的相関関係を求めた。その結果は第6図bのようであり、密度検層とガンマ線検層の各応答の相関係数(r)は前者が0.94(ただし深度160m以深の部分を除く。これは特異な例として後述する)、そして後者が0.86であ

り、いずれも松島地区の場合よりもさらに高い相関性を示し、地層の対比が可能であると考えられる(第9図)。すなわち7号井の深度19-41m間は6号井の深度16-37m間の安山岩質溶結凝灰岩と同層準であると推定される。GR-Dクロスプロット図(第10図b)から、透水性が最も良好な部分は深度41-73m間であると推論される。他

MATSUSHIMA



第7図 宮城県松島地区山下井と黒沢井における各種検層
Radiation logs and another existing data, Matsushima.



第8図 山下, 黒沢の両検層のガンマ線-密度クロスプロット
 GR-D crossplots of Yamashita and Kurogasawa wells.
 a—Yamashita well
 b—Kurogasawa well

方, 密度検層応答はそのプローブ機構(放射線の照入射窓に指向角を与え, この面を壁側に圧着させるタイプ)上, スクリーンが計数に影響する率は小さくなり, 一般に無視できる。ところが, 7号井の底部近辺に位置するスクリーン部はすべて容積密度が小さくなっていて, 明らかに異常である。7号井の開発当初の種々の様子を知ることは上述の異常原因を究明するための助けとなる。町の水道事業所から7号井の開発を請負った会社が, 掘さく終了後, 揚水試験準備のため循環泥水除去作業である10数日間にわたる仮の連続揚水を行ったが, 水のにごりは依然として解消できなかった。それで, その後さらに断続的にスワッピング作業を繰り返した結果よ

うやく清水を得ることができたとのことである(6号井ではこのような問題は特に生じなかった)。このようなに限り不解消の原因が, いわゆる“ハマグリ水”によるものか, または段階揚水試験における一時的な過剰揚水による粘土分溶解によるものかは当時不明であった。

放射能検層図を種々検討した結果, 上記のように限り発生の原因は帯水層中の粘土分溶解によるものであると容易に明言できる。すなわち, 6号井の下部のスクリーンほど粘土分の溶解傾向が強いが, これは清水にするための長期間にわたる洗浄や揚水作業によりスクリーン周辺の粘土分が排除され, そのマイナスした体積分がみかけ容積密度を過小に見積る原因になったものと云える。6号井の密度検層応答(第9図の実曲線)にはこのような現象はみられないが, ガンマ線検層応答(第9図の点曲線)では下部スクリーン部に7号井の場合と同様な異常が認められ, 7号井と同様に6号井の同層準の帯水層もある程度の粘土分を含有していることが推定される。したがって, もし無理な揚水を行った場合, 7号井で生じたようなトラブル発生の可能性も充分にありうる。

(iii) 帯水層の性状

自然放射線強度と容積密度の分布値から考えて, この地域の各地層中の粘度分は全体的に深度40m以深, 深度の増大とともに増大する傾向をもっている。したがって, 40m以深の帯水層では浅いところのものほど透水性が良いであろうと推論される。

4.1.3 涌谷地区

涌谷町公民館の近くに一本の休止井がある。この井戸は開発当初, 通常の水井戸と変わらず揚水を続けていたが, そのうち, 次第に塩素イオン濃度が高くなり(230 ppm)現在休止している(第5図の位置図参照)。

今回の放射能検層実験はこの井戸を借用して実施された。

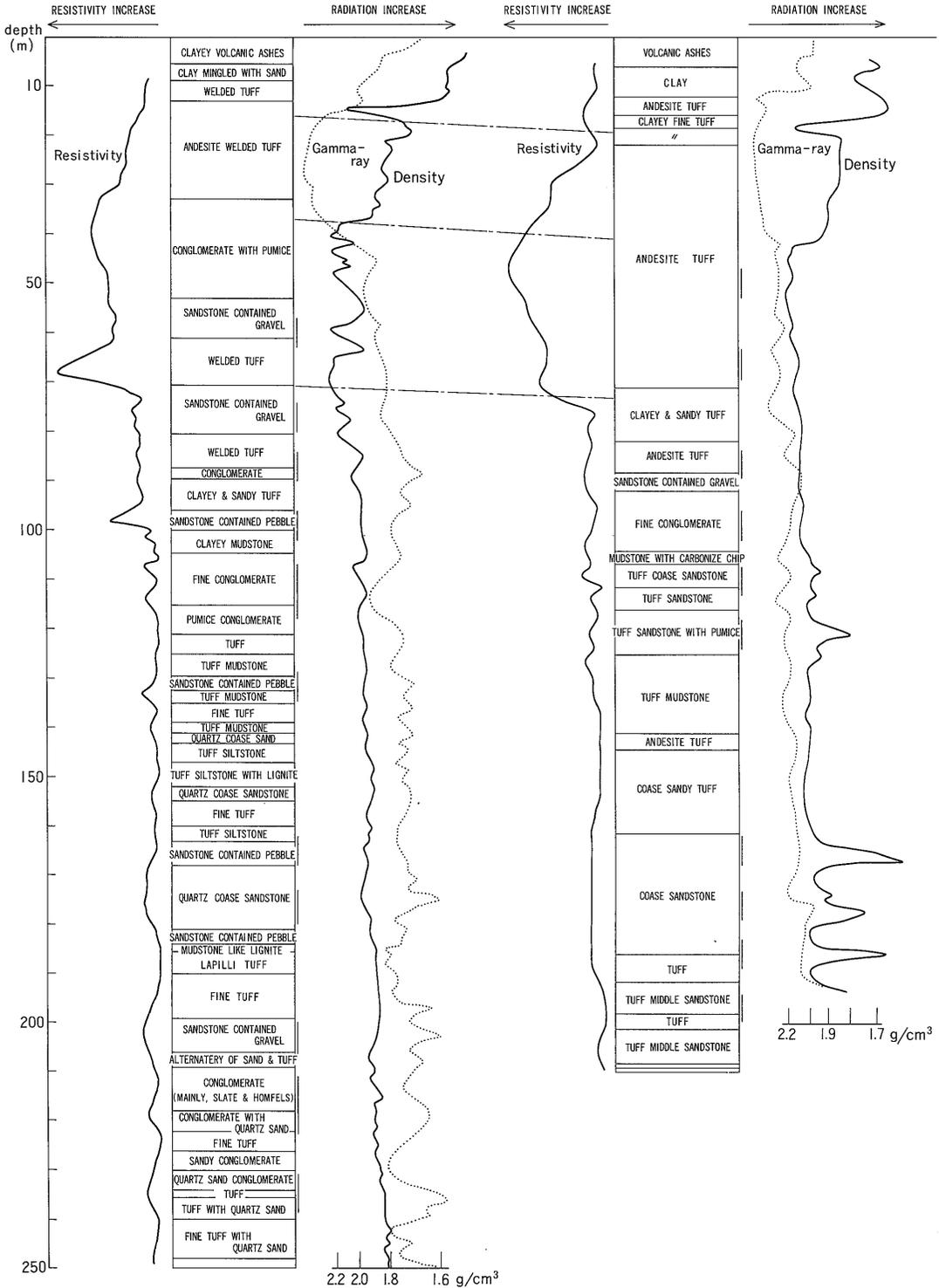
藤田(1972)はかつて地質学的立場から, 宮城県下の多くのさく井資料をもとに, 第三系帯水層のこのような水質を生む機構について研究した。それによると, 地下水が高い塩素イオン濃度をもつ条件として海成層の存在が先ず必要であるが, その他に, 向斜または盆地状底部に位置すること, そしてさらに, この地層端部が閉塞された構造下にある場合に塩素イオンが最も高濃度になると報告している。今回放射能検層を実施したこの涌谷井はまさにその向斜構造中に位置する(高橋ほか, 1969)。

ガンマ線検層と密度検層の図は第12図に, そしてそのクロスプロット結果は第13図にそれぞれ示される。これらから次項のような解釈ができる。

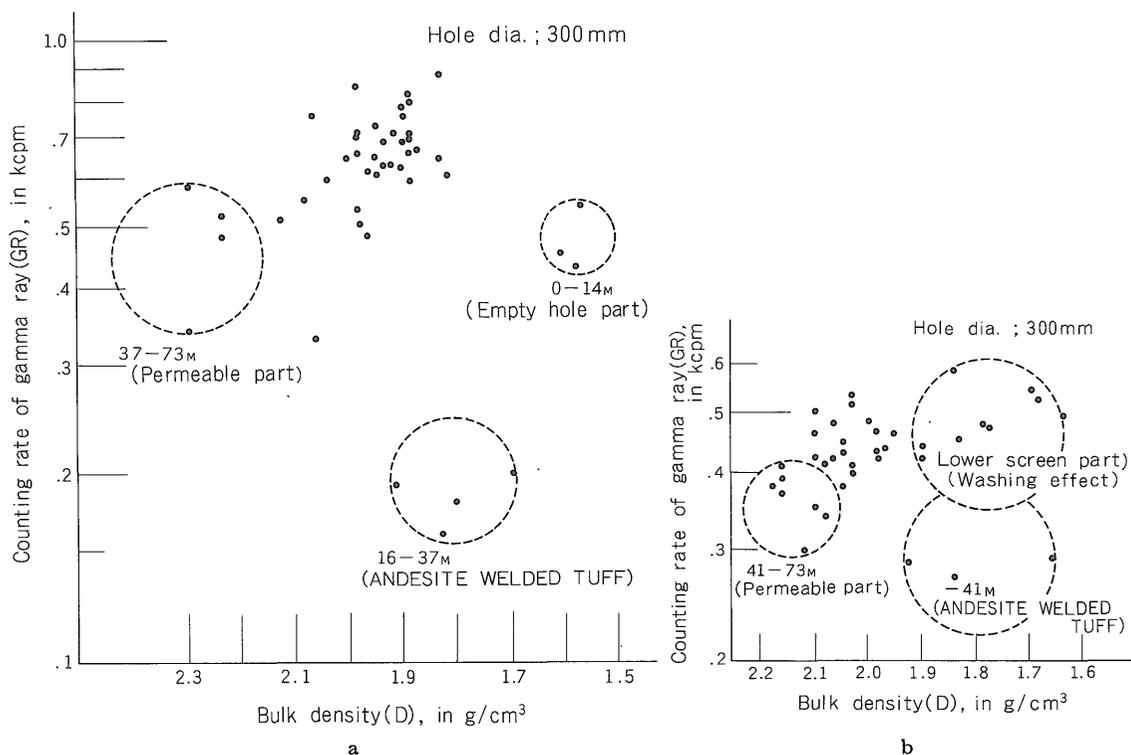
WELL NO. 6

YABUKI

WELL NO. 7



第9図 福島県矢吹井における各種検層
Radiation logs and another existing data, Yabuki.

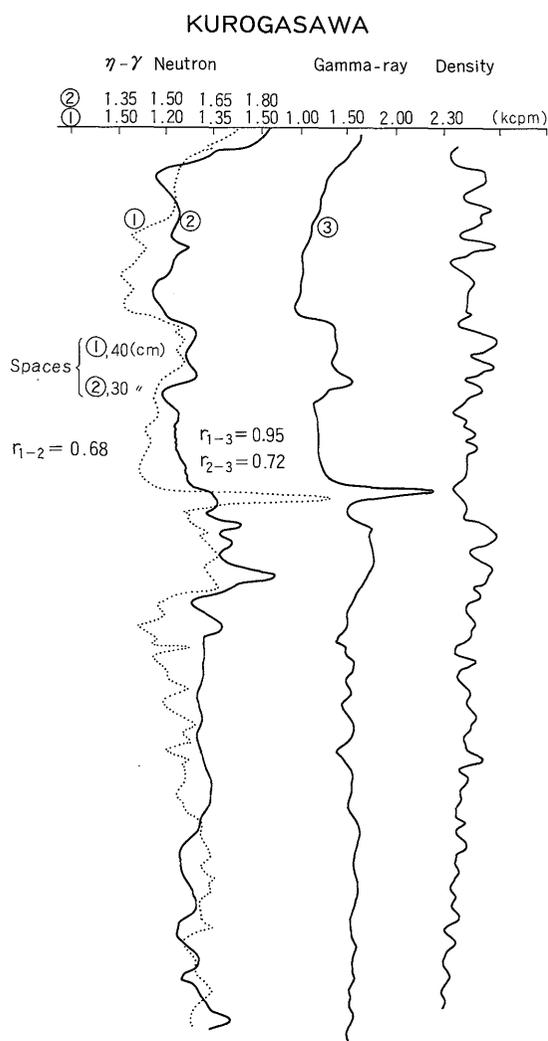


第10図 矢吹検層のガンマ線-密度クロスプロット
GR-D crossplot of well nos. 6 and 7, Yabuki.
a—well no. 6 b—well no. 7

- (i) 深度 4-18 m 間は比較的に低い自然放射線強度を示す。みかけ容積密度との関係から考えて、これは一般に掘さく柱状図に示したような粘土ではなくシルトであると解釈できるが、反復して実施した検層のデータ比較から判断して、他の原因による応答変化である可能性も大きい。すなわち、坑内側壁軌道を異にする複数回の測定による応答間に大きなバラツキがあったことから、掘さく時の坑壁崩壊による坑径拡大と、ケーシング外壁間のクリアランスを充填する不均質な埋土物質を計数したことによることも充分に考えられる。
- (ii) ガンマ線検層と密度検層、2つの応答間のクロスプロット図 (第13図) から、鮮新世陸成の亀岡層と中新世の地層 (網木・青麻層などの黄金迫層群) との境界は物理的にみて深度46mあたりとみられる。そしてまた、図中の左下部の破線で囲んだ部分は、ガンマ線検層と密度検層の両応答が極端に近いことを示している。これは深度にして115-122mと146-152mの区間に相当する。
- (iii) 一般に、密度検層、ガンマ線検層と電気検層の各応答から透水性が良好な地層を定性的に求める方法として、高い容積密度、低い自然放射線強度、そして高い電気比抵抗の総合的關係が大きい部分をさがす。ここでは、これに該当するものとして先ず前述の115-122mと146-152m間の両深度区間が挙げられる。しかしこれらの区間は後述の中性子検層を加えた解析結果から、良好な透水性を示す地層ではなく、実は低間隙率の固結岩であることが判明している (4.2.2節で詳述)。次に考えられる透水性のよい区間は第12図中のおもに電気検層図から58-76m間の“小礫混りの第三紀砂岩層”が挙げられる。

4.2 中性子検層

今回はじめて試験する $n-\gamma$ 中性子検層は N-D クロスプロット解析法の研究がその目的であり、過去において密度検層を行った同じ井戸で実施することを計画した。このため、終局的には松島地区黒沢井、涌谷地区涌谷井と伊勢崎地区伊勢崎井の3井がその対象となった。



第11図 ガンマ線検層とn-γ中性子検層間の応答相関(黒沢)
Log correlation between n-γ neutron logs and gamma-ray log, Kurogasawa.

4.2.1 松島地区

この地区の黒沢井においてn-γ中性子検層試験を実施した。この井戸は地質調査目的の試験井なので口径が小さく、また挿入ケーシングパイプは鉄製でなく塩化ビニール製であった。ここでの中性子検層結果は第11図中に併載した。この図から、中性子検層応答の曲線性状はガンマ線検層応答の曲線性状と高い相関関係にあることがわかる。

一般に、n-γ中性子検層で検出されるガンマ線は“中性子捕かきによる2次的ガンマ線”の他に“中性子線源

自体から発生する1次ガンマ線”と“自然ガンマ線”が含まれる。なお、中性子線源自体から発生する1次ガンマ線は強度が一定しているので密度検層を同時に実施することによりバックグラウンドとしての計数を知ることができるし、自然ガンマ線もまたガンマ線検層実施とそのデータ比較を通して知ることができる。したがって、中性子検層とガンマ線検層の両応答が高い相関関係にあるということは、中性子検層応答が自然ガンマ線に大きく影響されていることを意味する。このような結果になった理由として下記事項が挙げられる。

- (i) 黒沢井は小口径(75 mmφ)のため、坑井影響を除去するのに用いる偏心機具をプローブに装着できないので、プローブをフリーに垂下させる状態で検層を実施した。そのために中間媒体物である坑内水による中性子吸収が増加した。
- (ii) ケーシング材として使用している塩化ビニールがまた中性子を吸収増大させた。
- (iii) 今回使用した中性子線源(Am-Be)の強度は比較的に小さ過ぎた(30 mCi)。

以上のように、松島地区で得た中性子検層データは、その特性を十分に発揮できなかった。

4.2.2 涌谷地区

この地区のn-γ中性子検層は先に密度検層を行った涌谷公民館脇の水井戸で実施した。第12図右端にその結果を示す。

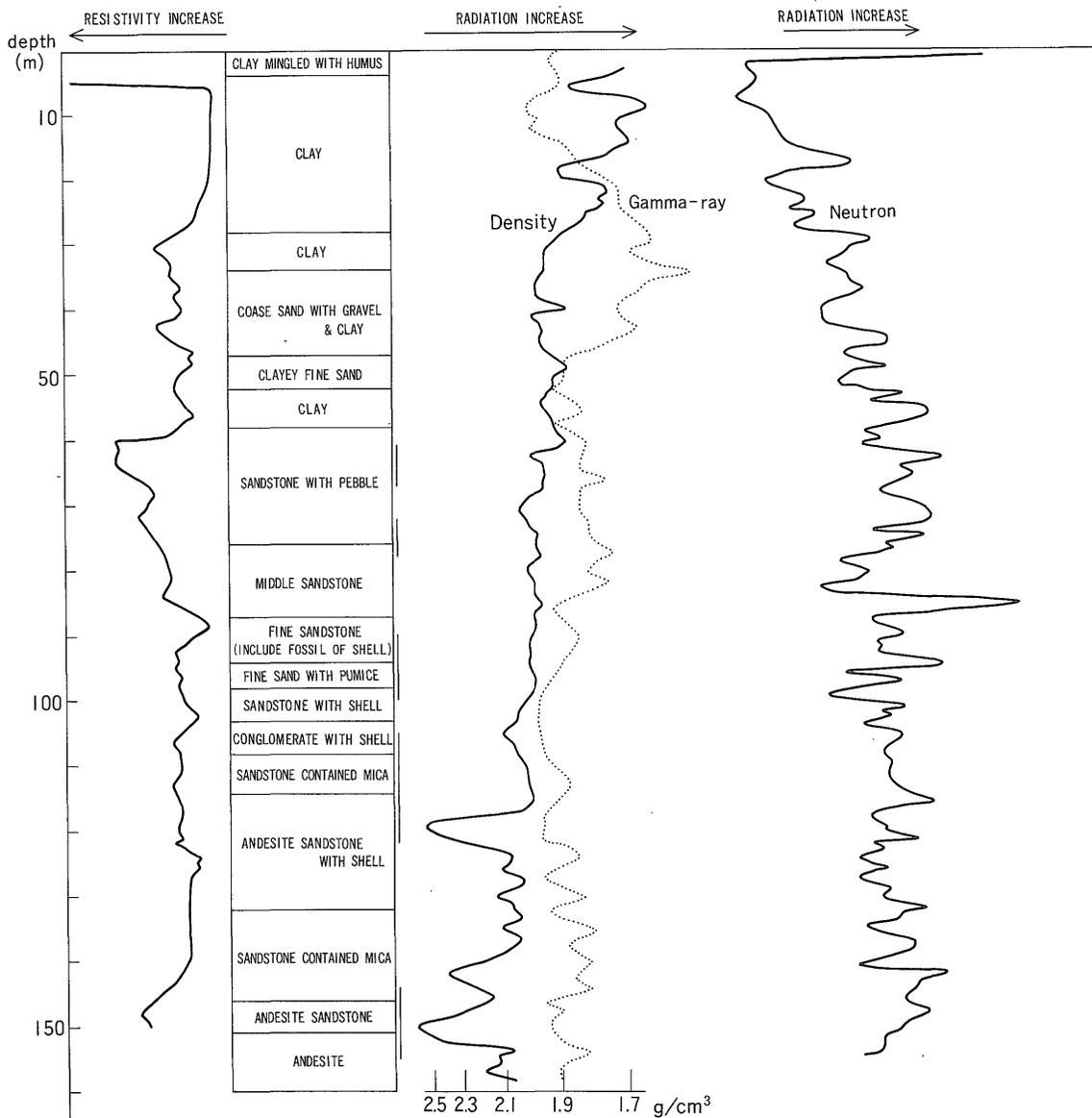
前述のように、この水井戸は初め淡水であったが、その後の過大な揚水で次第に塩素イオン濃度を増し230 ppmまで達した。これにより揚水を休止し現在に至っている。その後の水質検査から、少なくとも井戸の周辺は当初の淡水状態に戻っており、n-γ中性子検層応答の塩分補正を必要としなかった。また、第12図中の各検層曲線性状の比較から知れるように、松島地区の場合のような自然ガンマ線による大きな影響はみられない。そして密度検層の応答曲線とは逆の相関関係を示している。したがって、松島地区の検層応答の場合のような種々の影響も多少含まれるであろうが、D-Nクロスプロット解析にある程度利用できるデータを得ることができたといえる。

4.2.3 伊勢崎地区

伊勢崎市東毛地域にある深度400mの水井戸は過去数回にわたり密度検層とガンマ線検層を実施しており、この周辺の地層は深度400mまでおもに砂と礫がほぼ連続的に堆積していることが判っている。

第14図は上述の密度検層とガンマ線検層、それに中性子検層の結果を追加併載している。また、各検層応答間

WAKUYA



第12図 宮城県涌谷井における各種検層
Radiation logs and another existing data, Wakuya.

の相関は次表から知れるように、ガンマ線検層と中性子検層間の相関は伊勢崎井の方が涌谷井に比べて高いことから、自然ガンマ線の影響を受けやすい条件下にあったようである。

中性子検層と密度検層間の関係は前述の影響分だけ相関性が負方向に薄れたが、これは第14図の曲線性状から

も涌谷井と同様な逆相関傾向を示していることが知れる。

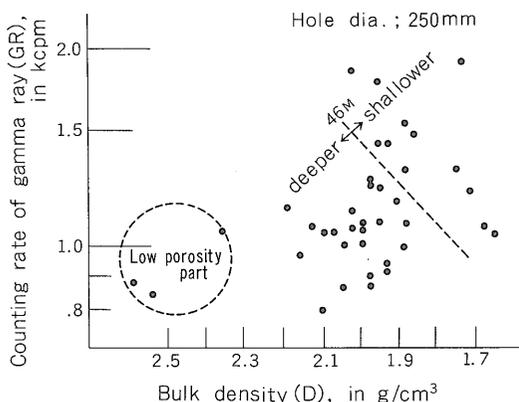
4.3 D-N クロスプロット解析

4.3.1 涌谷地区

涌谷井で得た密度検層と $n\gamma$ 中性子検層の両データを用い、第3章で述べたWUらによる D-N クロスプロッ

第4表 ガンマ線と中性子及び密度と中性子の各検層応答間の相関
Correlation coefficients γ among log response data of gamma-ray, density, and neutron.

	γ_1 (GR vs N)	γ_2 (D vs N)
Kurogasawa well	0.72	
Wakuya well	0.17	-0.51
Isezaki well	0.38	-0.23



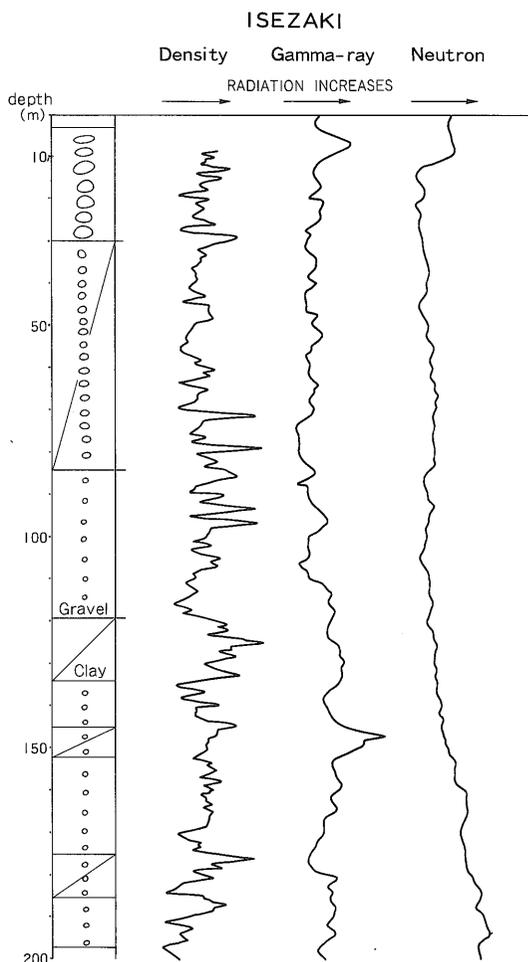
第13図 涌谷検層のガンマ線-中性子クロスプロット
GR-D crossplot, Wakuya well.

ト解析法に沿ってクロスプロット図を作成すると第15図のようになる。この図から、 $\rho_{ma}-\rho_f$ 線(細砂線)の上部にプロットした各点はいずれも深度28mまでの応答値であり、未固結性のシルト・粘土であることを示す。他方、 $\rho_c-\rho_f$ 線に沿ってプロットする各点は、115-122mと146-152m間の深度区間を代表する応答値であり、グラフ上ほぼ垂直軸(ϕ_D 軸)方向のみの移動であることから無孔質の固結性岩層で構成されていることを証明している。

この図で、細砂線に最も接近していて透水性がよいと考えられる部分は深度にして18m、33mと40mの近辺で、粘土・シルト層に挟まれた砂・礫の薄層部分であることが知れる。上記以外のプロット点はいずれも図中に示されるように、クロスプロット三角形内中央部に集中的に分布する。この中には前節の記述で、おもに電気検層図から透水性が比較的によくと推測されていた深度58-76m間の小礫混り砂岩層も含まれるが、ここでは中間的な透水性をもつ部分として総括される。

4.3.2 伊勢崎地区

伊勢崎井における密度検層と $n-\gamma$ 中性子検層から得た

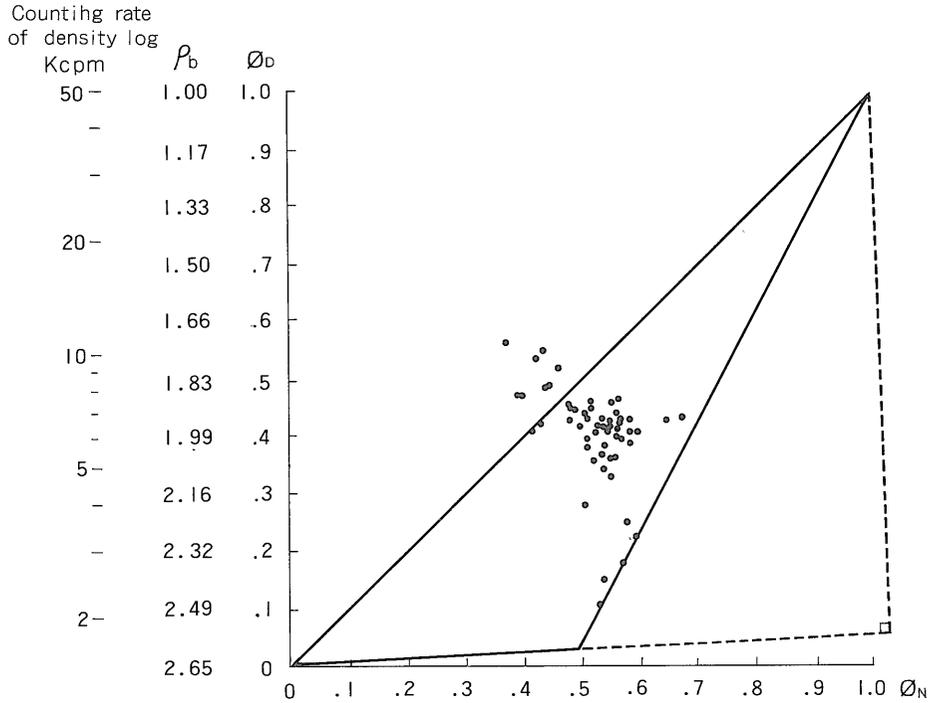


第14図 群馬県伊勢崎井における各種検層
Radiation logs made after cased well,
Isezaki, Gumma Pref.

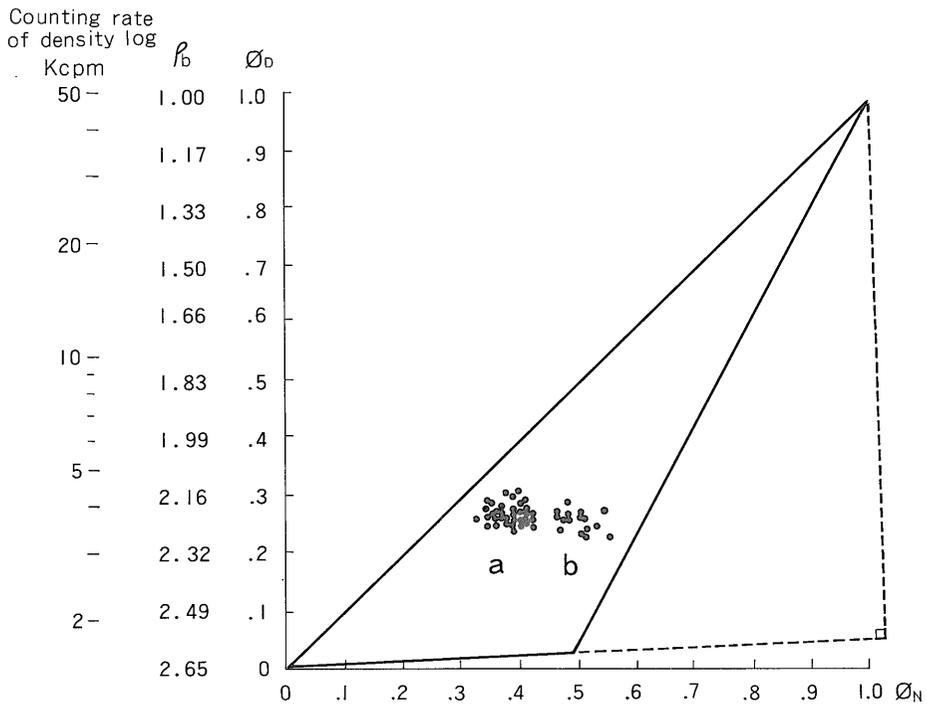
両データを涌谷地区の場合と同様に WU and KRUG による D-N クロスプロット解析法に沿ってクロスプロット図を作成すると第16図のようになる。この図から、深度150mを境に a と b、2つのグループに分けられる。b グループは a グループと比べて垂直軸(ϕ_D 軸)方向にはあまり変化しないことからみて固結度が特に進んだ地層であるというのではなく、水平軸(ϕ_N 軸)方向のみの移動であることから粘土含有率が増大した地層であると推定できる。

4.4 中性子検層の今後の問題

松島地区黒沢井での中性子検層応答が自然ガンマ線の影響を強く受けていたこと、さらに涌谷井及び伊勢崎井の場合も少なからず同様の影響があったことが認められ



第15図 涌谷検層の密度-中性子クロスプロット
D-N crossplot, Wakuya well.



第16図 伊勢崎検層の密度-中性子クロスプロット
D-N crossplot, Isezaki well.

る。すなわちこれを完全に無視できるほど中性子検層応答が優勢ではなく、結果として、今回の検層に用いた中性子線源の強度は計数精度上不充分であったことになる。したがって、前節で記した各クロスプロット解析では粘土分と有効間隙率の定量的算定をせずに定性的範囲内での検討にとどめた。この問題を解決するためにはより大きな中性子線源を用いる必要がある。しかしながら、検層作業上、それが人体への危険性を増大させる結果になる。もしこれを危惧するならば、高価ではあるがパルス発生装置を用いる人工線源の使用を考えるほかない。いずれにせよこのような方法で計数誤差を除去し、かつ正確なクロスプロット解析が可能となるような解析法の検討が今後の課題となるであろう。

文 献

- ALGER, R. P. (1963) Formation density log applications in liquid-filled holes. *Jour. of Petrol. Tech.*, Mar., p. 321-332.
- BAKER, P. E. (1957) Neutron capture gamma-ray spectra of earth formations. *Petrol. Trans. of AIME*, vol. 210, p. 97-101.
- 藤田博志(1972) 深層地下水におけるストラクチャーコントロール. 東北大学地質古生物研究所邦報, no. 73, p. 111-121.
- 小鯛桂一(1978) 帯水層評価のための放射能検層の研究. 地調月報, vol. 29, p. 101-126.
- KRUG, J. A. and COX, D. O. (1976) Shaly sand crossplot—a mathematical treatment. *The Log Analyst*, vol. 17, no. 4, p. 11-15.
- POUPON, A. (1970) Log analysis of sand-shale sequence—a systematic approach. *Jour. of Petrol. Tech.*, Jul., p. 867-881.
- RANSON, R. C. (1977) Methods based on density and neutron well-logging responses to distinguish characteristics of shaly sandstone reservoir rock. *The Log Analyst*, vol. 18, no. 3, p. 47-61.
- 高橋兵一・松野久也(1969) 5万分の1地質図幅「蒲谷」及び同説明書. 地質調査所.
- THIBIDEAU, F. D. (1977) A pulsed neutron generator for logging. *The Log Analyst*, vol. 18, no. 6, p. 12-16.
- WU, C. H. and KRUG, J. A. (1978) Density-neutron crossplot analysis for shaly gas sands using hand-carried calculators. *The Log Analyst*, vol. 19, no. 4, p. 3-10.
- YOUMANS, A. H., HOPKINSON, E. C. and WICHMANN, P. A. (1966) Neutron lifetime logging in theory and practice. *Soc. Prof. Well Log Analyst, 7th Ann. Logging Symposium, May, Trans.*, p. Q1-Q17.
- , DON BISHOP, W. and WICHMANN, P. A. (1970) Application of the neutron lifetime log in new wells. *Soc. Prof. Well Log Analyst, 10th Ann. Logging Symposium, May, Trans.*, p. N1-N20.

(受付: 1980年5月30日; 受理1980年6月21日)