講 演
 Lecture

Petrophysics の不確実性*

小 松 英 雄^{**,†}

(Received August 25, 2017 ; accepted November 9, 2017)

Discussion of uncertainty relating to petrophysical analysis

Hideo Komatsu

Abstract : Petrophysical interpretation result is essential information for subsurface evaluation so we have to devote to reduce uncertainty of it. Although accuracy of interpretation parameters is regarded as critical factor of uncertainty of petrophysical interpretation result, measurement and interpretation model are not complete also so play important role of uncertainty in reality. Uncertainty analysis may help to find cause of uncertainty but it tend to assume perfection of interpretation method. In this paper, examples of problem of current measurement tools, flaw of interpretation and uncertainty analysis method are showed, and importance of understanding of cause of uncertainty, and validation with other information like oil/gas shows, are stressed to reduce the petrophysical interpretation uncertainty.

Keywords : petrophysics, uncertainty, log interpretation

1. はじめに

Static Model (地質モデル) のインプットとして, あるいは埋蔵量評価パラメーターとして, 井戸位置での情報(孔隙率, 岩相, 浸透率, 水飽和率)はある種の「ハードデータ」として扱われる。しかし実際には, 当然, それらにも不確実性は存在する。

「Petrophysics 評価の不確実性」ということで, 本稿ではとくに検層解析の不確実性について,

- ・ 不確実性をもたらす原因を整理し
- ・ その大まかな範囲を説明した上で
- ・ 不確実性評価方法について

概観する。

「不確実性」というのは「エラーのとりうる範囲」という捉え方も可能であり, 本稿ではエラーと不確実性を同義に取り扱う。

2. 測定に起因する不確実性

まず始めに, 検層ログ測定時, あるいは測定後の処理の

時点で生じうる誤差・不確実性について概観する。

測定誤差は「精度」と「再現性」の, 大きく 2 つに分けて考えることができる。前者は「同じ試料を繰返し測定した時, 平均測定が真の値にどれだけ近いのか」後者は「同じ試料を繰返し測定した時, 測定値がどれだけバラつくのか」を示す。

検層ツールがどの程度の精度を有しているのかに関する情報は, 大抵の場合, サービス会社が提供するカタログから得ることができる。例えば Schlumberger 社の密度検層ツールである“LDS” ツールの場合, 「 ± 0.01 [g/cm³] の精度」「 ± 0.014 [g/cm³] の再現性」となっている。これは, 例えば 15 [pu] の砂岩であればだいたい ± 0.5 [pu] (相対誤差 3%) の精度に相当する。しかしこれは理想的な状態での精度である。

「理想的な状態」は大抵のツールにとっては, 以下で示す測定環境を指す。

- ・ 坑内状況が良好
- ・ 岩石が石英, 方解石, もしくは苦灰石のいずれか 1 鉱物のみからなる
- ・ 地層流体が地層水で満たされている
- ・ 地層が鉛直方向, 水平方向に無限に均質に続いている
- ・ 坑井は垂直に掘削されている

実際にはこれら全ての条件が満されることはほとんどないので, 検層ツールはカタログに記載されている以上の誤差をもつ。

* 平成 29 年 6 月 14 日, 平成 29 年度石油技術協会春季講演会, 地質・探鉱部門シンポジウム「地質リスクと不確実性評価」にて講演
 This paper was presented at the 2017 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “The Geological Risk Assessment and Resource Uncertainty on Technical Evaluation” held in Tokyo on June 14, 2017.

** 国際石油開発帝石株式会社 INPEX Corporation

† Corresponding author : E-Mail : hideo.komatsu@inpeco.jp

2.1 鉱物組成と地層流体組成

鉱物組成として石英、方解石、もしくは苦灰石のうち1種類が100%を占めている岩石を真水が飽和している地層の場合は、ほとんどの孔隙率ツールはサービス会社が提供している機能、もしくは単純な線形変形によって測定値（カーブ読み値）から孔隙率を得ることができる。その際必要となるパラメーターは一般的に知られている値が使われるため、測定値から孔隙率を得る操作は「計算」とほぼ同等となる。

しかし上で挙げた3鉱物が混合している岩石や、これら3鉱物以外の鉱物（例えばイライトなどの粘土鉱物や黄鉄鉱などの重鉱物など）が混入している地層では、単純な「計算」により孔隙率を得ることはできない。

また、ある検層ツールが利用している物性値が水とは大きく異なる流体（通常は炭化水素）が占めている場合には、ログの測定値から直接計算した孔隙率の誤差は大きくなる。

水が孔隙中を占める割合、「水飽和率」は、検層解析の目的となる物性値の1つではあるが、通常は孔隙率と地層の比抵抗値に基づき算出される。これは、水と炭化水素が大きく異なる比抵抗値をもつことを利用したものだが、比抵抗以外の検層ツールが測定する物性値においても両者は多少異なっており、とくに炭化水素が気相であった場合には、補正なしに正確な孔隙率を求めることはできない。

これらの理想状態からの乖離は一般的な地層で生じている状況であるため、それを解消する手法はすでに存在し、広く用いられている。しかしそれは「計算」ではなく「解析」になり、新たな不確実性をもたらす原因となっている。「解析」については後ほど述べる。

2.2 ツールデザインに起因する問題

検層ツールの垂直分解能および探査深度はツールにより異なる。例えば中性子検層ツールは垂直分解能はだいたい30 [cm]、探査深度は約20 [cm] であるのに対し、密度検層ツールは垂直分解能は約20 [cm]、探査深度約10 [cm] 程度となっており、通常同時に取得され孔隙率評価時にも組み合わせられることの多いツールであるものの、実際には密度検層ツールの方がより狭い地層領域を測定している。図1は異なる物性をもつ2つの地層の境界を、坑壁から10 cm、20 cm、30 cm にそれぞれ設定した場合のログレスポンスシミュレーターの結果で、中性子検層カーブは境界が20 cm から30 cm へと変化した場合でも値に差が生じているが、密度検層カーブではその差がほとんど出ていない。また、図2は地層境界付近での密度検層カーブと中性子検層カーブのシミュレーション結果だが、垂直分解能の相違を反映し、地層境界の影響を受ける範囲は密度検層カーブの方が狭くなっている。

そのため、泥水濾過水が地層流体を置換した、フラッシュドゾーンがログレスポンスに与える影響は、両ツールで異なる。孔隙率計算では孔隙間を占める流体の種別により使用するべきパラメーターが変わるが、通常解析手法は両ツールがフラッシュドゾーンからの影響を同程度受けていることが前提となっているため、フラッシュドゾーンの物

図1 異なる Flushed Zone 深度での密度検層（赤線）と中性子検層（青点線）での挙動の違い

図2 物性境界付近での密度検層（赤線）と中性子検層（青点線）の挙動の違い

性が泥水濾過水の侵入を受けていない地層の物性と大きく異なっていて、かつフラッシュドゾーンが浅い場合、解析誤差は大きくなる。

また、自然ガンマ線検層、密度検層、中性子検層、比抵抗検層を用いて粘土鉱物量、孔隙率、そして水飽和率を求める場合、各検層ツールの垂直分解能は異なっているので、砂岩・泥岩境界付近や薄互層環境では不確実性が大きい結果となる。これは測定中、検層ツールが地層に引っ掛かりながら巻き上げられる、“Stick and Slip”が生じているとさらに誤差が大きくなる。

これら、測定に関わる問題は広く認識されており、ある

程度は補正・対処が可能だが、そのためには誤差発生原理や補正の限界についての正確な理解が必要である。

3. 解析に起因する不確実性

3.1 解析不確実性の原因

通常の検層解析では複数（例えば密度検層ツールを用いて孔隙率を計算する場合、標準的な Shaly Sand 解析の式を用いると最低6つ）のパラメーターが必要とされるが、それらパラメーターのほとんどは解析者の「解釈」に委ねられている。

最も適切なパラメーターを選択するためのノウハウは存在し、またパラメーター選択エラーに対して頑強な解析手法も存在するものの、とくに初心者にとってはパラメーター選択こそが検層解析そのものであると考えられがちであり、また一般的に、このパラメーター選択時に生じる「エラー」が、検層解析不確実性の全てであるとみなされることが多い。

しかし実際には、パラメーター選択以外にも検層解析不確実性をもたらす原因は多数存在している。現在使用されている解析モデルは、特定の条件下でのみ適切な結果が得られる、ある種の近似式であるにもかかわらず、その条件下以外の環境へ適用されているケースや、文献および解析ソフトウェア自体の混乱、そして現在の解析モデルの限界が、パラメーター選択以外の検層解析不確実性の原因となるものである。

3.2 解析モデルの選択

先述のとおり、鉱物組成として石英、方解石、もしくは苦灰石のうち1種類が100%を占めている岩石であれば、孔隙率（ ϕ ）や水飽和率（ Sw ）は単純な「計算」により算出することが可能である。例えば、密度検層ログ ρ_b と比抵抗検層ログ Rt 、および解析パラメーター ρ_{fl} 、 ρ_{ma} 、 Rw 、 m 、 n を用いて、

$$\phi = \frac{\rho_b - \rho_{ma}}{\rho_{fl} - \rho_{ma}} \quad (1)$$

$$Sw = \sqrt[n]{\frac{1}{\phi^m} \frac{Rw}{Rt}} \quad (2)$$

といった、よく知られた式より得ることができる。

しかしこれらの式は、複数の鉱物からなっている地層、とくに粘土鉱物が含まれる地層では、適切な結果を得ることができない。図3は、粘土鉱物を含む地層のコア孔隙率から上で挙げた式で計算した孔隙率を引いた結果のヒストグラム、図4は同じ地層を適切な式を用いて計算した孔隙率を用いたヒストグラムであり、明らかに前者は不適切な結果となっている。水飽和率に関しても同様に、上で述べた式では不適切な結果となる。

また、同じ値を得るのに複数の手法が存在し、その選択によって不適切な結果が得られてしまう場合もある。

例えば、地層中の粘土鉱物量（ Vcl ）を求めるための手法（式）として、自然ガンマ線、自然電位、中性子検層、

図3 解析孔隙率エラーヒストグラム
(コア分析値から解析値を減じたもの。粘土鉱物を考慮しないケース)

図4 解析孔隙率エラーヒストグラム
(コア分析値から解析値を減じたもの。粘土鉱物を考慮したケース)

密度検層と中性子検層の組み合わせ、比抵抗など、異なる検層カーブや、同じ検層カーブでも異なる式を用いた、複数の手法が提唱されており、多くの検層解析ソフトウェアで利用可能となっている。そして多くの場合、異なる手法で得られた粘土鉱物量は一致しない。

これは各手法が前提としている環境が異なるのが原因である。例えば、自然電位検層ログ由来の粘土鉱物量は、粘土鉱物種の変化に対しては頑強である一方、水飽和率が低い場合には不正確になるのに対し、比抵抗由来の粘土鉱物量は水飽和率がきわめて低いガス層以外では不正確な結果しか得られない。自然ガンマ線を使う手法は地層流体種の変化に対して頑強である一方、粘土鉱物種が変動する場合にはパラメーターをきめ細かく調整する必要がある。密度検層と中性子検層の組み合わせから求める手法も同様に粘土鉱物種や、ガス飽和率に注意する必要があるが、垂直分

解能が他の手法に比べ高いので、深度ごとの粘土鉱物量は最も正確に得られる可能性がある。

3.3 旧式のコンセプト・モデルの適用

このように、より確度の高い解析結果を得るためには、環境に応じた適切な手法を選ぶ必要があるが、それには評価している貯留層や手法についての十分な理解が必要となる。

しかし、用語やその用法が時代や文献により異なる場合があり、手法の適切な使用方法や適用限界を理解する上で混乱の元となっている。例えば検層解析の上では“Shale”と“Clay Mineral”を明確に区分しない傾向があり、“Shale Volume”といった際にそれが粘土鉱物量を指しているのか細粒碎屑物量を指すのかが自明ではない場合がある。また、“PHIN”という単語も文献によっては「中性子検層ログの読み値そのもの (NPHI)」を指す場合と「中性子検層データから求めた孔隙率」を指す場合とがある。

さらにはさまざまな制約や時代背景により、文献で紹介されている、あるいはソフトウェアに採用されている手法は必ずしも全てが正確なものではない。

3.3.1 全孔隙率の計算式

乾燥した粘土鉱物の密度はおおむね $2.65 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ であるとみなされていた時代の文献 (例えば Juhasz, 1981) では密度検層ログと式 (1) を用いて得られた孔隙率が全孔隙率 (ϕ_t) であり、有効孔隙率 (ϕ_e) は

$$\phi_e = \phi_t - Vcl \times \phi_{cl} \quad (3)$$

(ただし、式 (3) 中の ϕ_{cl} は粘土鉱物量 100% 時の全孔隙率) という式で算出されている場合がある。これはあくまでも乾燥した粘土鉱物の密度が $2.65 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ である場合のみ妥当な手法であるが、その前提を無視して適用されている例も散見する。

3.3.2 Archie の式 (その 1)

「Archie の式」というと式 (2) の他、

$$Sw = \sqrt[n]{\frac{a}{\phi^m} \frac{Rw}{Rt}} \quad (4)$$

という形の式を見ることがある。

この式は、Winsauer *et al.* (1952) が提唱した、

$$FRF = \frac{Ro}{Rw} = \frac{a}{\phi^m} \quad (5)$$

がもととなっている式 (ただし Ro は水飽和率 100% 時の岩石比抵抗値) であるが、 FRF は孔隙率が 100 [pu] の時には 1 になるので、 a が 1 以外になるのは論理的に不合理である。これは Winsauer が本来 1 本の回帰直線で表現できない、異なるデータセットを使用しているためであり、実際には異なる m 値をもつ、 $a = 1$ のデータ群として捉えるべきと考えるのが現在では主流となっている (例えば Matute *et al.*, 1992)。

3.3.3 Archie の式 (その 2)

Archie の式も、実際には近似式 (経験式) に過ぎず、

理論的な裏付けはない。Archie の式の妥当性は長年の使用により確認されているものの、例えば今後 Digital Rock Phisycs などに拡張するためにも、理論的裏付けを有した代替式が必要とされている。

Archie の式を代替するモデルはさまざまなアイデアが提唱されてきたが、その中でも式 (6) で示すモデル (ただし水飽和率 100% ケースのみ示す) が近年精力的に研究されている。

$$Co = Cw \times \phi \times E_0 \quad (6)$$

式 (6) 中の E_0 は例えば Berg, (2012) では $\gamma^{-2}C^{-1}$ (ただし、 γ は tortuosity, C は電場の向きに対する pore throat の平均断面積と有効断面積の比率), Kennedy and Herrick (2012) では

$$E_0 = \frac{\phi - \phi_\theta}{1 - \phi_\theta} \quad (7)$$

で表される (ϕ_θ は effective conductive path が存在できる最小孔隙率)。

Berg のモデルは Digital Rock に対して、Kennedy and Herrick はさまざまな Core Sample に対して、Archie の式と同等以上に実測値に合うことが確認されている。しかし図 5 では、実際のコア試料の FRF と孔隙率データを用いて、Archie の式でフィッティングした結果を赤線で、Kennedy and Herrick の式を用いた結果を緑で示しているが、両者の差異それほど大きいものではない。

3.3.4 インドネシアの式

ある程度以上の量の粘土鉱物が存在する地層で水飽和率を計算する手法の 1 つとして、Poupon and Leveaux (1971) が提唱したいわゆる「インドネシアの式」は、その後提唱された式に比べ計算手順が簡単で、当時の電卓でも計算可能であったこともあり、同様の手法の中では非常にポピュラーであるが、理論的背景の欠如に加え、得られた結果が

図 5 Core FRF データに対する Archie (赤) と Kennedy and Herrick (緑) のフィッティング比較

不正確であることが指摘されている。例えば Woodhouse and Warner (2005) は、Dean Stark 法で求めたコアの水飽和率と複数の解析手法で計算した水飽和率を比較し、インドネシアの式から得られる結果は他の手法から得られる手法から乖離しており、かつコア水飽和率と合わないことを報告している。

4. 不確実性評価方法

以上では、検層解析不確実性をもたらす原因を要素ごとに説明してきた。

実際には、それらのうちいくつか容易に対処可能であり（例えば「マルチミネラル解析」という手法や、本稿でも使用しているログレスポンスシミュレーターを用いた「フォワードモデリング」「インバージョン」を使えば探査深度や垂直分解能の相違の問題は解消可能であるし、複数のログを使用することで検層ツールの計測エラーの影響を軽減することが可能）、またいくつかの要素は互いにキャンセルアウトするもの、逆に相関するものもあるため、検層解析の不確実性は要素単位ではなくプロセス全体として評価する必要がある。

検層解析結果の不確実性、もしくはエラーを検討する際には、

- ・ 解析結果の精度の評価
- ・ 解析結果の不確実性をもたらしているものはどこにあるのかの検証

の2つの視点があり得る。

前者は、例えば求めた孔隙率・水飽和率について、「これらの貯留層区間平均値が実際にはどの程度の幅を持っているか」あるいは「各深度で実際にはどの程度の幅を持っているか」について評価するもので、通常「不確実性」というとこのことを指すことが多いが、一方で後者も精度向上の上で重要な情報となる。

4.1 解析的な手法

解析式（あるいはそれをテラー展開したもの）を特定のパラメーターやカーブについて偏微分し、そしてその不確実性で評価する手法。水飽和率や孔隙率といった解析結果の振れ幅の他、各パラメーターの寄与率も評価可能である。

計算時間がかからないので、一度モデルを作成すればすぐに（解析作業中にでも）結果を得られるのがメリットであるが、現状ではメジャーな検層解析ソフトウェアに実装されていないため、モデルを各自で構築する必要がある。

4.2 モンテカルロ法

一方、モンテカルロ法を用いた解析結果の不確実性評価は最も一般的な手法だといえる。

「モンテカルロ法」は、発生させた乱数がある計算モデルのインプットデータとして与えて、計算結果の幅を評価する手法であり、検層解析不確実性評価では通常各インプットカーブと解析パラメーターの「不確実性の幅」と、「その不確実性がどのような分布型をもつか」（三角分布、正規分布、一様分布など）を解析者が与えることで実行さ

れる。

ただし、解析パラメーターのいくつかは相関をもっているため、不確実性評価に際してはその相関を適切に設定できているかを注意する必要がある。例えば、自然ガンマ線ログと密度検層ログとで相関が認められている場合、「GR Clay」（粘土鉱物 100% 時の自然ガンマ線ログ値）と「 ρ Clay」（粘土鉱物 100% 時の密度検層ログ値）が取りうる値は互いに相関する。また、水層と解釈される地層の比抵抗測定値 (R_t) を横軸、解析孔隙率を縦軸にとり両対数でプロットすることで、回帰直線の傾きの逆数から m を、孔隙率 = 100 [pu] 時の切片から R_w を見積ることが可能だが（「Pickett Plot」）、この手法を用いる場合、 m 、 R_w と解析孔隙率との間に相関が生じる。傾き (m) の取り方によって切片 (R_w) も変化する（例えば m を大きくすると R_w は小さくなる）ため、 m と R_w は相関し、さらに解析孔隙率の不確実性によってプロットの形状も影響を受ける（例えば孔隙率が小さく見積られていれば分布が低孔隙率側に偏るので R_w は小さく見積もられることになる）ためである。

モンテカルロ法による不確実性評価は、シンプルで分かりやすく、主要な検層解析ソフトでは利用可能となっていることがメリットとして挙げられる。さらに埋蔵量評価にどの部分（どのインプットカーブ、どの解析パラメーター）の不確実性が最も大きな影響を与えているかの評価も「トルネードチャート」の形で表示可能であり、これにより解析精度を上げるために確度を改善すべきパラメーターの抽出が容易となる。

ただし、モンテカルロ法による解析結果不確実性評価では、

- ・ 不確実性評価結果自身、不確実性評価に使用したパラメーター（不確実性の幅）にコントロールされる
- ・ 解析モデルが正しいことが前提となっている
- ・ ランダムエラーとシステムエラーの扱いやパラメーター同士の相関の扱いが解析ソフトウェアによって異なる

といった問題があり、「解析結果の不確実性の幅」を評価する目的で使用する場合には注意が必要である。

4.3 コアとの比較

コア測定値と、その試料に対応する深度での検層解析値との比較（主に孔隙率）も解析結果不確実性評価のために一般的に用いられる手法である。

コアとの比較は、特定の解析モデルや不確実性評価のためのパラメーター設定に結果が影響されないという点がメリットとして挙げられる。一方、どのインプットカーブや解析パラメーターの不確実性が解析結果に最も影響を与えているかについての情報は得られない点がデメリットとなる。

また、用いべき情報はコアプラグ深度でのコア分析値と検層解析値の「ばらつき（幅、分散、標準偏差）」ではなく、その差の「平均値」となる。この情報から不確実性の幅を求めるためには、コアプラグ数を考慮に入れて「母平均の

推定」という作業が必要となるが、コア分析結果そのものの不確実性やコアプラグと検層ログの深度合わせの精度、さらにはコア試料は通常貯留層のごく一部しか代表していないため、「サンプリングバイアス」に関しても考慮する必要がある。

5. お わ り に

現在の検層ツールや解析手法はまだ不完全であるため、原理的には検層解析結果の不確実性は大きい。

しかし、検層解析は貯留層評価の上ではハードデータとして扱われることが多いため、不確実性は極力小さく、かつその原因を明確に把握しておく必要がある。

油ガス徴や生産テスト結果など、物理検層ログ以外の情報もソフトデータとして援用し検層解析結果を検証するとともに、不確実性評価を解析ワークフローとして組み込み、不確実性を小さくする工夫が必要である。

引 用 文 献

- Berg C. F., 2012 : Re-examining Archie's law: Conductance description by tortuosity and constriction. *Physical Review*, 86(4).
- Juhasz I., 1981 : Normarized Qv - The key to shaly sand evaluation using the Waxman-Simits equation in the absence of core data. *SPWLA annual logging symposium Proceedings*, 23.
- Kennedy W. D. and Herrick D. C., 2007 : Conductivity models for Archie rocks. *Geophysics*, 77(3), 109-128.
- Matute R. E., Lyle W. D. and Sprunt E. S., 1992 : Improved Data-Analysis Method determines Archie Parameters From Core Data. *SPE 19399*.
- Poupon A. and Leveaux J., 1971 : Evaluation of Water Saturation in Shaly Formations. *The Log Analyst*, 12(4), 3-8.
- Winsauer W. O., Shearin H. M. Jr., Masson P. H. and Williams M., 1952 : Resistivity of Brine-Saturated Sands in Relation to Pore Geometry. *AAPG Bulletin*, 36(2), 253-277.
- Woodhouse R. and Warner H. R. Jr., 2005 : Sw and Hydrocarbon Pore Volume Estimates in Shaly Sands - Routine Oil-Based-Mud Core Measurements Compared With Several Log Analysis Model. *SPE96618*.
- Berg C. F., 2012 : Re-examining Archie's law: Conductance description by tortuosity and constriction. *Physical Review*,