

# 弾性波速度と比抵抗を組合せた 物理探査結果解釈の概要

安藤 誠<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

物理探査は、広範囲な領域を比較的簡便に調査でき、直接的に物性構造モデルを得ることができる利点がある。物理探査の測定・解析技術に関しては近年の情報処理技術の向上とともに高精度化が図られている。しかし、物理探査の解析結果の解釈については、概略的な地質構造を把握するにとどまっている場合が多い。物理探査で得られる物性値（以降、物理探査物性値と称する）は、弾性波速度や比抵抗

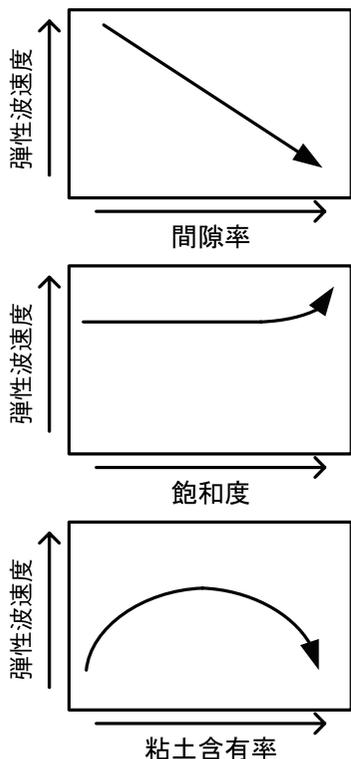
などに限られるが、それらを岩石の間隙率や飽和度などといった地質環境特性へと変換することができれば、工学的に非常に有用な情報となる。

弾性波速度は地盤の硬軟に関係しており、間隙率、飽和度、粘土含有率などにより変化する。弾性波速度とそれらの要因の関係を第1図に示す。

また、比抵抗は地盤の電気の流れにくさを表しており、間隙率、飽和度、間隙水の比抵抗、粘土含有率などにより変化する（例えば、(財)災害科学研究所トンネル調査研究会, 2001）。比抵抗に及ぼす影響の主な要因と比抵抗との関係を第1表に示す。

以上のように、物理探査物性値と地質環境特性には相関があり、物理探査結果を解釈することにより地質環境特性を把握することができる。一方、石油ガス探査分野では岩石物理学 (Rock Physics) の手法を用いた解釈技術が盛んに研究されており、物理探査物性を用いた石油貯留層の評価が行われている。岩石物理学では理論的なモデルを用いた解釈技術の研究が進展しており、物理探査物性から地質環境特性を評価する技術が研究されている (Mavko *et al.*, 1998)。

第1表 岩石の比抵抗に影響を及ぼす要因 ((財)災害科学研究所トンネル調査研究会, 2001より項目を抜き出して作成)。



第1図 P波速度と地質環境特性の関係 (Takahashi, 2000から作成)。

要因		岩石の比抵抗の高低
		低い ⇔ 高い
間隙率	飽和状態	大きい ⇔ 小さい
	乾燥状態	小さい ⇔ 大きい
飽和度		大きい ⇔ 小さい
粘土含有率		多い ⇔ 少ない
間隙水の比抵抗		低い ⇔ 高い

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 物理探査, 岩石物理学

対象とする地質環境により異なるが、弾性波速度と比抵抗の両者に影響を及ぼす地質環境特性(間隙率、飽和度、粘土含有率など)と、どちらか一方に影響を及ぼす地質環境特性(間隙水の比抵抗など)がある。両者に影響を及ぼす地質環境特性は、岩石物理学を用いて弾性波速度と比抵抗を組合せて解釈することにより、弾性波速度や比抵抗の単独で解釈を行うよりも精度よく把握することができる。また、どちらか一方に影響を及ぼす地質環境特性についても、間隙率など他の地質環境特性を精度よく求めることで、間接的に精度が向上すると考えられる。

本稿では、近年、弾性波速度と比抵抗を組合せて岩石物理学を用いて解釈を行った国内外の事例を示すとともに、現状の課題と解決方法について概説する。

## 2. 国内における解釈例

国内において、弾性波速度と比抵抗を組合せて解釈した事例で、1990年代後半までに行われた事例については、脇坂(1997)により整理された。それらの事例は、弾性波速度や比抵抗の単独の探査では解明できなかった地質構造などを明らかにしたが、最終的に工学的に必要な地質環境特性を把握しておらず定性的な解釈にとどまっていた。例えば、ダム分野では地質構造調査・岩盤分類の目的のために、弾性波・比抵抗・電磁波トモグラフィーの組合せの探査が行われた(鈴木ほか, 1994)。各トモグラフィーの結果は非常によく整合しており、高P波速度、高比抵抗、高電磁波速度異常の分布がほぼ一致しており、岩級のよいB級の部分と推定された。トンネル分野で、横矢ほか(1989)が施工前に変質帯の分布を把握することを目的に、屈折法探査と電気探査を実施した。その結果、特に著しい変質を受けて粘土化している箇所を、屈折法探査では低速度帯、電気探査では低比抵抗部としてほぼ同じ位置に捉えた。

これらのような、あくまで定性的な弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈に対して、岩石物理モデルを用いて定量的な解釈をした例として、羽竜(2000)がある。岩盤緩みの力学的モデルを考察し、それによる物理的变化として間隙率の増加と飽和度の低下に着目して、それらの指標をP波速度と比抵抗を用いて求めた。P波速度( $V_p$ )および比抵抗( $\rho$ )と間隙率( $\phi$ )

および飽和度( $S_w$ )の関係は、一般的に以下の式で表すことができるとした。

$$\rho = f(\phi, S_w; X) \quad \dots (1)$$

$$V_p = g(\phi, S_w; Y) \quad \dots (2)$$

ここで、 $f(x)$ は比抵抗に関する岩石物理モデル、 $g(x)$ はP波速度に関する岩石物理モデルである。X, Yは地質により異なる係数で室内試験より設定した。また、比抵抗に関する岩石物理モデルとして並列回路モデル(Patnode and Wyllie, 1950)を適用し、P波速度に関する岩石物理モデルとしてWyllieの式(Wyllie *et al.*, 1956)を用いた。

並列回路モデルは次の式で表される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\phi^m S_w^n}{a \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad \dots (3)$$

ここで、 $a, m, n$ は地質の違いによる係数、 $\phi$ は間隙率、 $S_w$ は飽和度である。 $\rho$ は地盤の比抵抗、 $\rho_c$ は粒子と流体の界面における表面伝導による比抵抗、 $\rho_w$ は間隙水の比抵抗である。

Wyllieの式は

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1-\phi}{V_m} + \frac{\phi S_w}{V_w} + \frac{\phi(1-S_w)}{V_a} \quad \dots (4)$$

で表される。ここで、 $V_m, V_w, V_a$ はそれぞれマトリックス、水、空気の弾性波速度である。

(3)、(4)の式は、未知数が間隙率と飽和度の2つの連立方程式となり、これを解いて間隙率と飽和度を決定した。自然斜面の緩みに対してこの手法を適用した結果、得られた間隙率と飽和度より岩層区分を明瞭にする効果が見られた。また、切土斜面の緩み把握に適用した結果、緩みの範囲を明瞭に識別できる効果が見られた。

鈴木ほか(2002)、楠見ほか(2006)も、羽竜(2000)と同様に、弾性波速度に関する岩石物理モデルと比抵抗に関する岩石物理モデルによる連立方程式を解いて、間隙率と飽和度を求めた。鈴木ほか(2002)は、花崗岩法面を対象に、表層部の緩み領域の深度分布を推定するために、屈折法探査によるP波速度分布

と電気探査による比抵抗分布から、飽和度および間隙率分布を推定した。P波速度に関する岩石物理モデルとしてWyllieの式(Wyllie *et al.*, 1956)、比抵抗に関する岩石物理モデルとしてアーチーの式(Archie, 1942)を用いた。間隙率と飽和度の推定結果を検証するために、TDR法(Time Domain Reflectometry)による体積含水率測定、簡易貫入試験などを行った。TDR法とは電磁波伝播速度から水分量を求める手法である。弾性波速度と比抵抗を組合せて解析した間隙率、飽和度、および体積含水率(間隙率×飽和度)は、TDR法および簡易貫入試験結果とほぼ整合した。

楢見ほか(2006)は、トンネル側壁における屈折法探査と電磁探査で得られたP波速度分布および比抵抗分布から間隙率、飽和度、および体積含水率を推定した。解釈の流れは、P波速度と間隙率および飽和度、比抵抗と間隙率および飽和度、それぞれの関係を定量的に把握するための室内試験を行い、その結果からP波速度および比抵抗の岩石物理モデルを求めた。P波速度に関する岩石物理モデルとしてはWyllieの式(Wyllie *et al.*, 1956)、比抵抗に関する岩石物理モデルとして以下に示す実験式を用いた。

$$\rho = m \cdot S_w^{-B} \cdot \phi^{-n} \quad \dots (5)$$

$m$ ,  $n$ ,  $B$ は地質の違いによる係数、 $\phi$ は間隙率、 $S_w$ は飽和度である。解釈結果の検討のために、得られた間隙率と穿孔エネルギーを比較した。穿孔エネルギーとは単位体積あたりの岩盤を穿孔するのに要したエネルギーを示しており、硬質な岩盤ほど穿孔エネルギー値は大きな値を示す。穿孔エネルギーと間隙率分布を比較すると穿孔エネルギーが大きくなる区間と間隙率の低い区間が一致することが確認できた。このことから、解釈結果である間隙率分布が地質状況の推定に有用な情報となることが示された。

以上の事例では、弾性波速度に関する岩石物理モデルと比抵抗に関する岩石物理モデルの連立方程式を解くことにより、間隙率と飽和度を求めている。

それらと異なるアプローチとして、猪原(2001)はP波速度と比抵抗から間隙率と飽和度を求めるプログラムを作成した。P波速度に関する岩石物理モデルとしてWyllieの式(Wyllie *et al.*, 1956)、比抵抗に関する岩石物理モデルとしてアーチーの式(Archie, 1942)、

並列回路モデル(Patnode and Wyllie, 1950)、およびKatsube and Humeの式(Katsube and Hume, 1983)を使用できるようにした。プログラムでは間隙率および飽和度を初期値として設定して、採用した岩石物理モデルを用いてP波速度と比抵抗を計算した。これらの結果と物理探査解析結果から既知としたP波速度と比抵抗を比較して、その差がより小さくなるように再計算して、間隙率と飽和度のモデルを逐次反復計算するプログラムとした。

### 3. 海外における解釈例

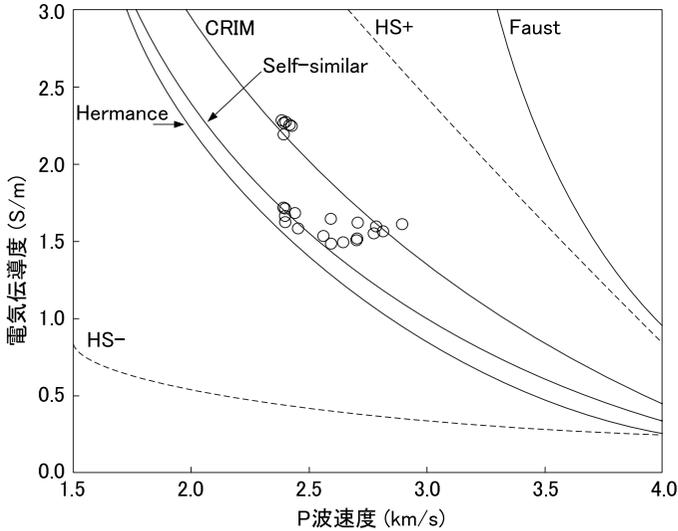
海外における弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈例として、主に石油ガス探査分野における研究を取り上げる。従来の石油ガス探査では反射法地震探査が主に行われてきたが、海底における電磁法探査の発展により、精度よく比抵抗を取得することが可能となった。そのため、従来は弾性波速度のみからの解釈例が主であったが、近年は弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈例が増えている。

異なる物理探査物性値である弾性波速度と比抵抗を組合せて解釈するために、直接、両者の関係式を求めている例がある。その中の古典的な式として、P波速度と比抵抗の関係を求めたFaust(1953)の式がある。ここでは、P波速度と比抵抗のそれぞれを経験的に深度と岩質に関連付けた後、この2つの関係式から、P波速度( $V_p$ )と深度( $Z$ )および地層比抵抗係数( $F$ )の経験式を導いた。

$$V_p = \gamma (ZF)^{\frac{1}{6}} \quad \dots (6)$$

ここで、 $\gamma = 2.2888$ としている。地層比抵抗係数とは、岩石の比抵抗を間隙水の比抵抗で除した値である。

Hacikoylu *et al.* (2006)は、固結した砂岩、頁岩、および未固結の頁岩のP波速度と比抵抗の関係とFaustの式を比較した。その結果、FaustのP波速度と比抵抗の関係は固結した砂岩にのみ適用可能であるとして、粘土含有率の大きな頁岩には適用できないとした。また、新たに未固結の頁岩に適用可能なP波速度と比抵抗の関係を、岩石物理モデルを用いて求めた。P波速度に関する岩石物理モデルとしてfriable-sandモデル(Dvorkin and Nur, 1996)を、比抵抗に関



第2図  
Gassmannの弾性波速度モデルと、様々な電気伝導度モデルの組合せにより計算したP波速度と電気伝導度の関係。丸は真岩の実測データ (Carcione *et al.*, 2007から作成)。

する岩石物理モデルとしてHashin-Strikmanの下限式を比抵抗に適用した式 (Berryman, 1995)を用いた。

Carcione *et al.* (2007)も、P波速度と比抵抗の関係を求めた。ここでは、P波速度と電気伝導度 (比抵抗の逆数) の関係を、多くの種類のP波速度に関する岩石物理モデル、比抵抗に関する岩石物理モデルを組合せて求めた。間隙率はP波速度と電気伝導度の両者に影響を及ぼすため、P波速度と比抵抗を関連付ける媒介として間隙率を用いた。以下の式によりP波速度 ( $V_p$ ) と電気伝導度 ( $\sigma$ ) の関係を求めた。

$$\sigma = f(\phi) \quad \dots (7)$$

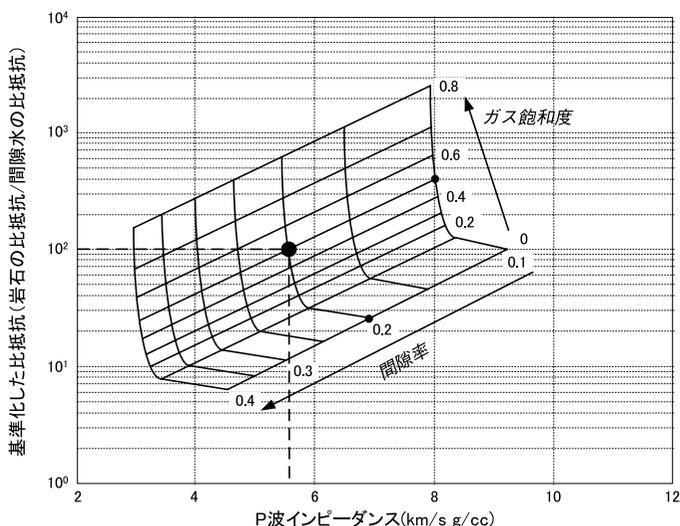
$$V_p = g(\phi) \quad \dots (8)$$

$$\sigma = f[g^{-1}(V_p)] \quad \dots (9)$$

$f(x)$  と  $g(x)$  は、それぞれ電気伝導度とP波速度に関する岩石物理モデルである。北海における検層結果と比較して、P波速度がGassmannのモデル (Mavko *et al.*, 1998)、電気伝導度がCRIM (Schön, 1996) およびself-similarモデル (Sen *et al.*, 1981) の組合せが、検層結果との整合性が良いと結論付けた (第2図)。もちろん岩石物理モデルの適用性は岩質などにより異なるため、調査するサイトにより適用できる岩石物理モデルは異なる。しかし、上に述べた手法によりP波速度と電気伝導度の関係が求められることを明らかにした。

フィールドへの適用例として、反射法地震探査から求められるP波インピーダンス (弾性波速度×密度) および電磁法探査から得られる比抵抗を用いて地質環境特性を求めるため、Gomez *et al.* (2008) は、岩石物理モデルを用いたテンプレートから砂岩の間隙率および飽和度を算出した。岩石物理モデルとして、弾性波はfriable-sandモデル (Dvorkin and Nur, 1996)、比抵抗はアーチーの式 (Archie, 1942)を用いた。P波インピーダンスと間隙率および飽和度の関係を岩石物理モデルにより計算したところ、P波インピーダンスの変化はほぼ間隙率に依存しており、飽和度の変化によるP波インピーダンスの変化はほとんどなかった。そのため、P波インピーダンスのみから間隙率と飽和度の両者を推測するのは難しい。そのため比抵抗による解釈が必要となるが、基準化した比抵抗 (岩石の比抵抗/間隙水の比抵抗) と飽和度の関係を見ると、飽和度に対する比抵抗の感度がP波インピーダンスと比較して高い。岩石物理モデルによる感度分析により、P波インピーダンスは間隙率に、比抵抗は間隙率と飽和度の両者に感度が高いことが分かった。これらを考慮してテンプレート (第3図) を作成して、P波インピーダンス、比抵抗より間隙率、飽和度を求めた。岩石物理モデルは適用する岩種などにより多くの種類が存在するが、このようなテンプレートを作成して間隙率および飽和度を求める手法は、どの岩石物理モデルの組合せにも適用することができるという利点があったとした。

Harris and MacGregor (2006) は、比抵抗とP波イ



第3図  
 基準化した比抵抗とP波インピーダンスのテンプレート(Gomez *et al.*, 2008から作成)。大きな黒丸は基準化した比抵抗とP波インピーダンスの交点、小さな黒丸は交点から間隙率およびガス飽和度への投影。

ンピーダンスから間隙率とガス飽和度(=1-水飽和度)を求めた。弾性波速度(P波, S波)に関する岩石物理モデルとしてHertz-Mindlin式(Mindlin, 1949)を用い、比抵抗に関するモデルとしてアーチーの式(Archie, 1942)を用いて、間隙率およびガス飽和度に対する感度分析を行った。その結果、P波インピーダンスが間隙率に、比抵抗が水飽和度に依存していることを明らかにした。ただし、これは適用するサイトの条件によるものであり、現に他のサイトではS波インピーダンスと比抵抗の組合せが適切である例もあったとした。重要なのは、感度分析を事前に岩石物理モデルを用いて行うことにより、最も有効に地質環境特性を得ることができる物理探査の組合せを選択することとした。

その他にも、弾性波速度と比抵抗を組合せて岩石物理モデルにより定量的に解釈した例として、Hoversten *et al.* (2003)がある。弾性波速度と電気伝導度の径時変化を組合せて二酸化炭素圧入に伴う水飽和度、有効応力、CO<sub>2</sub>/石油比の変化を推定した。物理探査として弾性波トモグラフィー(P波, S波)、および電磁トモグラフィーを二酸化炭素の圧入前後で行った。解析の結果、独立したインバージョンによりそれぞれ求められたP波速度、S波速度、電気伝導度の空間的な分布に相関が見られなかった。二酸化炭素圧入による影響がP波速度、S波速度、電気伝導度すべてに現れるとすると、これらの分布にはある程度の相関があると考えられる。相関を持たせるための解析手法として、電磁トモグラフィーによる電気伝導度を

基に、岩石物理学モデルによる電気伝導度とP波速度の関係を用いて、電気伝導度分布からP波速度分布の初期モデルを作った。その初期モデルを用いてインバージョンを行いP波速度分布の最終モデルを求めた。P波速度の最終モデルを基に、同様にP波速度とS波速度の関係から、S波速度分布の初期モデルを作り、S波速度を計算した。さらに、得られた解析結果について、岩石物理モデルを適用して定量的解釈を行った。弾性波速度に関する岩石物理モデルはfriable-sandモデル(Dvorkin and Nur, 1996)、電気伝導度ではアーチーの式(Archie, 1942)を用いた。アーチーの式において、間隙率の時間変化はなく、時間変化するのは水飽和度と間隙水の電気伝導度のみとなる。間隙水の電気伝導度に変化はないとして、電気伝導度の二酸化炭素圧入前後の変化から水飽和度の変化を推定した。次に推定した水飽和度の変化とS波速度の変化からリザーバーの有効応力の変化を求めた。最後に、水飽和度と圧力変化の影響を考慮に入れてP波速度変化から二酸化炭素と石油の比率の変化を推定した。

#### 4. 弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈の課題

弾性波速度分布および比抵抗分布から地質環境特性を個別に求めると、互いの誤差が相乗する。従来の方法では、例えば、間隙率を求めて、それを岩石物理モデルに代入して飽和度を求めていた。この方法では、間隙率に誤差が含まれている場合には、求

められた飽和度の誤差が大きくなるものとなる。Bachrach (2006)は、それを避けるためにベイズの方法を用いた同時解釈を実施した。ここでは弾性波速度と比抵抗の組合せではないが、P波インピーダンス、S波インピーダンス、および密度の異なる物理探査物性の組合せから間隙率および飽和度を同時解釈により求めた。弾性波速度と比抵抗の組合せにおいても、このような手法の適用は有効であると考えられる。

また、従来の研究では、主に弾性波速度分布および比抵抗分布を別々に求めて、それらを組合せて解釈していた。しかし、両者を用いた解釈の問題点として、常に組合せた解釈が可能な、ある程度相関のある構造が得られるとは限らないところにある。すなわち解析により何種類かの構造が挙げられることになり、それらのうち何が最良であるかを決定する必要に迫られる。このような場合、弾性波速度分布および比抵抗分布を同時にインバージョンすることが有効となる。同時インバージョン手法の1つとして、岩石物理学的な手法を用いた弾性波速度と比抵抗の直接の関係(例えばFaust (1953)の式)を制約条件とするものがある。しかし、Carcione *et al.* (2007)に示すように、すべての岩質における弾性波速度と比抵抗の関係を単一のモデルで示すことはできない。弾性波速度と比抵抗の間には岩質の違いにより多様なモデルがあり、確立された関係式が存在しないため、様々な岩質を含む範囲において、この手法を用いて同時インバージョンを行うのは難しい。それに対して、Gallardo and Meju (2003)は以下の式に示すクロスグラディエントを用いて比抵抗分布とP波速度分布を結びつけて解析を行った。

$$\nabla m_r(x, y, z) \times \nabla m_s(x, y, z) \quad \dots (10)$$

ここで、クロスグラディエントが0となる制約を用いて、同時インバージョンを行った。また、 $m_r$ は比抵抗( $\rho$ )の対数、 $m_s$ はP波速度( $V_p$ )の逆数(スローネス)である。

$$m_r = \log \rho \quad \dots (11)$$

$$m_s = \frac{1}{V_p} \quad \dots (12)$$

クロスグラディエントが0になるということは、比抵

抗の対数およびスローネスの変化が、両者の値の大小に関わらず、同じ方向もしくは真逆の方向に生じることを意味しており、これを用いることにより比抵抗分布とP波速度分布に相関を持たせている。クロスグラディエントを用いたインバージョン結果を基にして、弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈を行うと、従来の個別にインバージョンした解析結果を解釈する場合と比較して、弾性波速度と比抵抗の関係に含まれる解析結果の相関の悪さに起因する誤差が少なくなる。また、弾性波速度と比抵抗の関係がより鮮明に現れてくるため、地質環境特性を精度よく求められる可能性がある。

従来の研究においては、対象とする地質環境特性が飽和度と間隙率の場合がほとんどであった。しかし、例えば沿岸部での地下水利用や高レベル放射性廃棄物地層処分においては、地下水の塩淡境界が問題となっている。そのため、これまでは比抵抗から間隙水の比抵抗を求めて塩分濃度に換算して塩淡境界を求める解釈がなされていた。しかし、弾性波速度から間隙率や粘土含有率を求めてから、間隙水の比抵抗を求めるなどの手法を用いて、弾性波速度と比抵抗を組合せて解釈すると、比抵抗のみからの解釈と比較して、より精度よく塩分濃度の推定を行うことができると思われる。

また、従来の手法では弾性波と比抵抗で成り立ちの異なるモデルを用いて、それらをなんらかの手法(連立方程式など)を用いて地質環境特性を求めていたが、弾性波速度と比抵抗の両者を統一的に説明できる岩石物理モデルを求めることが最終的には必要になると考えられる。

## 5. まとめ

岩石物理学を用いて弾性波速度と比抵抗を組合せて解釈した国内外の事例についてまとめた。

国内においては、P波速度に関する岩石物理モデルと比抵抗に関する岩石物理モデルによる連立方程式を解いて間隙率と飽和度を求めている事例が見られた。

海外における、弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈例として、主に石油ガス探査分野における研究を取り上げた。異なる物理探査物性値である弾性波速度と比抵抗を組合せて解釈するために、両者の直接

の関係式を求めている事例, および両者から定量的に地質環境特性を求めている事例を紹介した。

従来は弾性波速度分布および比抵抗分布を別々に求めて, それらを組合せて解釈していたが, クロスグラディエントを用いたインバージョン結果を基にして, 弾性波速度と比抵抗を組合せた解釈を行うと, 弾性波速度と比抵抗の関係がより鮮明に現れてくるため, 地質環境特性を精度よく求められる可能性がある。また, 従来は弾性波速度と比抵抗で成り立ちの異なるモデルを用いて, それらをなんらかの手法(連立方程式など)を用いて地質環境特性を求めているが, 最終的には弾性波速度と比抵抗の両者を統一的に説明できる岩石物理モデルを求めることが必要になると考えられる。

弾性波速度と比抵抗を組合せて岩石物理学を用いて定量的に解釈した例は, 特に国内で, まだ少ないのが現状であり, 今後さまざまな分野において行われることが期待される。

**謝辞:** 本稿執筆にあたり, ご助言を頂いた産業技術総合研究所の内田利弘氏, 応用地質(株)の東氏に感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- Archie, G. E. (1942) : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146, p.54-62.
- Bachrach, R. (2006) : Joint estimation of porosity and saturation using stochastic rock-physics imaging, *Geophysics*, 71, p.53-63.
- Berryman, J. G. (1995) : Mixture theories for rock properties, in Ahrens, T. ed. *A Handbook of Physical Constants*, AGU, p.205-228.
- Carcione, J. M., Ursin, B. and Nordskag, J. I. (2007) : Cross-property relations between electrical conductivity and the seismic velocity of rocks, *Geophysics*, 72, p.193-204.
- Dvorkin, J. and Nur, A. (1996) : Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea datasets, *Geophysics*, 61, p.1363-1370.
- Faust, L. Y. (1953) : A velocity function including lithologic variation, *Geophysics*, 18, No.2, p.271-288.
- Gallardo, L. A. and Meju, M. A. (2003) : Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data, *Geophysical Research Letters*, 30, p.1-4.
- Gomez, C. T., Dvorkin, J. and Mavko, G. (2008) : Estimating the hydrocarbon volume from elastic and resistivity data: A concept, *The Leading Edge*, 27, No.6, p.710-718.
- Hacikoylu, P., Dvorkin, J. and Mavko, G. (2006) : Resistivity-velocity transforms revisited, *The Leading Edge*, 25, No.8, p.1006-1009.
- Harris, P. and MacGregor, L. (2006) : Determination of reservoir properties from the integration of CSEM and seismic data, first break, 24, p.15-21.
- 羽竜忠男 (2000) : 岩盤緩みに対する電気比抵抗と地震波速度特性, *物理探査学会第102回学術講演会論文集*, p.327-331.
- Hoversten, G. M., Gritto, R., Washbourne, J. and Daley, T. (2003) : Pressure and fluid saturation prediction in a multicomponent reservoir using combined seismic and electromagnetic imaging, *Geophysics*, 68, p.1580-1591.
- 猪原芳樹 (2001) : 小区間の弾性波速度と比抵抗値による地質調査手法の検討, *応用地質学会平成13年度研究発表会論文集*.
- Katsube, T. J. and Hume, J. P. (1983) : Electrical resistivities of rocks from Chalk River, *Proc. Ws. Geophys. Geosci. Res. At Chalk River*, p.105-114.
- 楠見晴重・高橋康隆・中村 真 (2006) : 比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法, *土木学会論文集*, 62, No.4, p.603-608.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (1998) : *The Rock Physics Handbook*, Cambridge Univ. Press.
- Mindlin, R. D. (1949) : Compliance of elastic bodies in contact, *J. Appl. Mech.*, 16, p.259-268.
- Patnode, H. W. and Wyllie, M. R. J. (1950) : The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation, *Trans., AIME*, 189, p.47-52.
- Schön, J. H. (1996) : *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics*, Pergamon Press, Inc.
- Sen, P. N., Scala, C. and Cohen, M. H. (1981) : A self-similar model for sedimentary rocks with applications to the dielectric constant of fused glass Beads, *Geophysics*, 46, p.781-795.
- 鈴木浩一・楠 建一郎・藤光康宏 (1994) : 弾性波, 比抵抗, 電磁波トモグラフィー法の地質・岩盤調査への適用, *土と基礎*, 42, No.5, p.33-36.
- 鈴木浩一・伊藤栄紀・千木良雅弘 (2002) : 風化花崗岩表層の緩みと斜面内部への降雨の浸透 -物理探査と実測データを用いた検討-, *応用地質*, 43, No.5, p.270-283.
- Takahashi, I. (2000) : *Quantifying information and uncertainty of rock property estimation from seismic data*, Stanford University Thesis.
- 脇坂安彦 (1997) : 設計・施工への物理探査のシステム利用, *土と基礎*, 45, 9, p.23-25.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R. and Gardner, L. W. (1956) : Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, 21, No.1, p.41-70.
- 横矢直道・島 裕雅・樋渡純也 (1989) : 山岳トンネルにおける電気探査の適用例, *物理探査学会第80回学術講演会論文集*, p.260-262.
- (財)災害科学研究所 トンネル調査研究会 (2001) : 地盤の可視化と探査技術 比抵抗高密度探査法の実際, 鹿島出版会.
- ANDO Makoto (2009) : Overview of joint interpretation of seismic velocity and electrical resistivity from geophysical survey data.

<受付: 2008年12月17日>