

ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術の研究（その2） —堆積性軟岩の岩石モデル解析—

高橋 亨^{1*}・田中 莊一¹

¹財団法人 深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12）

*E-mail: takahashi@fgi.or.jp

国内に広く分布する堆積性軟岩の岩石モデルの構築を目的に、新第三紀砂質泥岩で取得された検層データと岩石コアサンプルの室内試験データを用いて、粒状体モデルの1つである砂質頁岩モデルの適用性を評価した。評価に当たっては、弾性波特性と変形係数に着目し、実測データとモデルによる計算値を比較検討した。その結果、ここで対象とした堆積性軟岩の弾性波特性は、粒度組成（粘土含有率）と拘束圧によって主に支配されており、その両特性をモデル化できる砂質頁岩モデルを用いて一般化できる可能性が高いことが確かめられた。また、歪の大きい領域での変形係数（静的ヤング率）についても、粒子間のすべりの有無をモデルに取り込むことによって表現できる可能性が高いことがわかった。

Key Words : geophysics, rock physics, soft sedimentary rock, binary sand/shale mixture model

1. はじめに

筆者達は、地盤・岩盤工学分野での物理探査データの解釈技術を高度化することを目的に、近年石油・ガス探査開発分野で積極的に研究、適用が進められているロックフィジックスを利用した解釈技術の研究を行っている。本報では、前報¹⁾で述べたデータベースに収録した物性データを用いて、地盤工学上の対象岩盤として極めて重要な堆積性軟岩の岩石モデルの構築を目的に、既往の岩石モデルの適用性を検討したので、その結果について報告する。

2. 堆積性軟岩の岩石モデル

堆積性軟岩は、国内に広く分布し、特に、多くの大都市の基盤岩となっていることからその工学的な重要性は極めて高い。堆積性軟岩の工学的特性については既に多くの研究が行われているが²⁾、物理探査で取得される弾性波速度などの物性に着目したモデル化の研究例はあまり多くない。しかしながら、国内では、兵庫県南部地震後に実施された活断層調査や大都市の深部地下構造調査で、関東平野の上総層群、濃尾平野の東海層群、京都盆地・大阪平野の大阪層群などの堆積

性軟岩の弾性波特性が明らかにされ、その特性の共通性・一般性が指摘されている^{3,4)}。

図-1 は、今回の研究で使用した国内の堆積性軟岩（新第三紀砂質泥岩）に属する5種類の岩盤で取得されたサスペンション PS 検層による P 波、S 波速度と室内試験や検層で得られた密度を用いて計算した P 波弾性係数（密度×P 波速度の二乗）とせん断弾性係数（密度×S 波速度の二乗）と、同じく室内試験で得られた間隙率との関係を表した相関図である。合わせて示した粒度分布図からもわかるとおり、粘土含有率が増加する（砂岩から泥岩に変化する）とともに、間隙率が増加し、弾性係数が低下するという特徴を示していることがわかる。

石油・ガス探査開発分野では、堆積岩については既に多くの岩石モデルが提案されている⁵⁾。それらの中で、粘土含有率の変化とともに間隙率が増減し、その結果として弾性波速度や強度が増減する特性を表すことのできるモデルとして二粒子岩石モデル(Binary sand/shale mixture model)が提案されている^{6,7)}。そこでここでは、堆積性軟岩の岩石モデルとして、二粒子岩石モデルを取り上げ、その適用性について検討を行った。

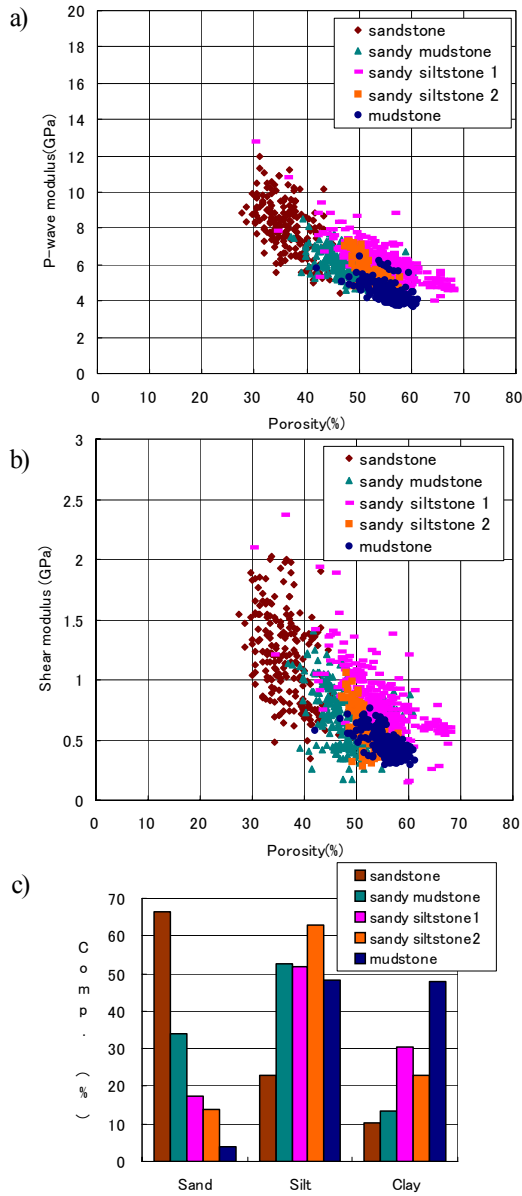


図-1 国内の堆積性軟岩の物性データ
(a) P波弾性係数と間隙率の関係
(b) せん断弾性係数と間隙率の関係
(c) 粒度分布

3. 二粒子岩石モデル

二粒子岩石モデルは、岩石を図-2に示すような大小2種類の粒子の集合体で近似し、これらの粒子間の相互作用によって岩石全体のマクロな特性を表すモデルである。図の左半分(①-②)は、頁岩質砂岩モデルと

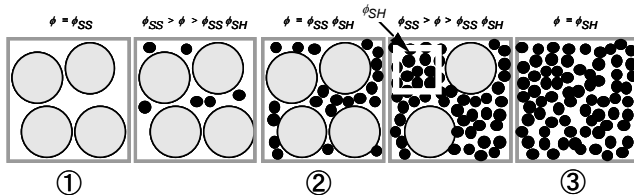


図-2 二粒子岩石モデル

呼ばれ、粘土含有率が増加するとともに、間隙率が減少し、弾性係数が増加するモデル、一方、右半分(②-③)は、砂質頁岩モデルと呼ばれ、粘土含有率が増加するとともに、間隙率が増加し、弾性係数が減少するモデルである。図-1に示す実測データの場合、粘土含有率が増加するとともに、間隙率が増加し、弾性係数が低下するという特徴を示しているので、ここでは、砂質頁岩モデルについてその適用性を評価した。以下には、Dvorkin et al. (2002)⁶⁾に従い、砂質頁岩モデルについて説明する。

砂質頁岩モデルの場合、図-2の右側に示すように、大粒子(砂粒子)が小粒子(粘土)に取り囲まれている状態を考えている。ここで、大粒子の数を L 、半径を R 、小粒子の数を I 、半径を r とする。また、大粒子、小粒子夫々一種類のみで充填された場合の間隙率をそれぞれ ϕ_{ss} と ϕ_{sh} とすると、岩石全体の体積 V_{total} と間隙の体積 V_{pore} はそれぞれ、

$$V_{total} = \frac{4}{3} \pi R^3 L + \frac{4}{3} \pi r^3 I / (1 - \phi_{sh}) \quad (1)$$

$$V_{pore} = \frac{4}{3} \pi r^3 I \phi_{sh} / (1 - \phi_{sh})$$

である。従って、岩石の間隙率は、

$$\phi = \frac{V_{pore}}{V_{total}} = \phi_{sh} / ((1 - \phi_{ss}) / \beta + 1) \quad (2)$$

と表される。ここに、

$$\beta = r^3 I (1 - \phi_{ss}) / R^3 L (1 - \phi_{sh}) \quad (3)$$

小粒子(粘土)の体積は、

$$V_{clay} = \frac{4}{3} \pi r^3 I / (1 - \phi_{sh}) \quad (4)$$

と表されるので、粘土含有率 C は次のように求められる。

$$C = \frac{V_{clay}}{V_{total}} = 1 / ((1 - \phi_{ss}) / \beta + 1) = \frac{\phi}{\phi_{sh}} \quad (C > \phi_{ss}) \quad (5)$$

次に、上述のように求めた粘土含有率(間隙率)を用いて砂質頁岩モデルの弾性係数を求める。砂質頁岩モデルは、硬い砂粒子の周りを軟らかい粘土粒子が取り囲んでいるモデルであるので、Hashin-Shtrikmanモデルの下限式を使用して任意の間隙率に対する弾性係数を計算するのが適当である⁶⁾。Hashin-Shtrikmanモデルの硬い側のエンドメンバーは、間隙率ゼロの砂粒子(石英と仮定)とし、その弾性係数を K_I 、 G_I とする。一方、軟らかい側のエンドメンバーは粘土のみで充填されている場合を想定し、その弾性係数を K_2 と G_2 とする。Hashin-Shtrikmanの下限式により、粘土含有率 C ($= \phi / \phi_{sh}$) を用いて、乾燥状態での岩石の体積弾性係数 K_{dry} とせん断

弾性係数 G_{dry} は、以下の式から求める⁸⁾。

$$\begin{aligned} K_{dry} &= \left[\frac{C}{K_2 + (4/3)G_2} + \frac{1-C}{K_1 + (4/3)G_2} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_2 \\ G_{dry} &= \left[\frac{C}{G_2 + Z} + \frac{1-C}{G_1 + Z} \right]^{-1} - Z \\ Z &= \frac{G_2}{6} \frac{9K_2 + 8G_2}{K_2 + 2G_2} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、硬い側の弾性係数(K_1 , G_1)は、石英の値を使用し、軟らかい側の粘土の弾性係数 K_2 と G_2 は、Hertz-Mindlinの式を用いて、以下の式から求める⁸⁾。

$$\begin{aligned} K_2 &= \left[\frac{n^2(1-\phi_{clay})^2 G_{clay}^2}{18\pi^2(1-\nu_{clay})^2} P \right]^{1/3} \\ G_2 &= \left[\frac{5-4\nu_{clay}}{5(2-\nu_{clay})} \left[\frac{3n^2(1-\phi_{clay})^2 G_{clay}^2}{2\pi^2(1-\nu_{clay})^2} P \right]^{1/3} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 G_{clay} ：粘土のせん断弾性係数、 ν_{clay} ：粘土のポアソン比、 ϕ_{clay} ：粘土の間隙率(= ϕ_{sh})、 P ：有効応力(拘束圧)、 n ：配位数(砂粒子間の接触数を表す量)。

飽和した岩石の場合には、Gassmannの式を使って、以下のように体積弾性係数 K_{sat} を求める⁸⁾。なお、せん断弾性係数は、飽和による変化はないので、 G_{sat} は G_{dry} と等しいとする。

$$\begin{aligned} K_{sat} &= K_{dry} + \frac{(1-K_{dry}/K_1)^2}{\phi/K_f + (1-\phi)/K_1 - K_{dry}/K_1} \quad (8) \\ G_{sat} &= G_{dry} \end{aligned}$$

ここに、 K_f は間隙流体(ここでは水)の体積弾性係数である。

以上のように弾性係数が得られると、以下の式に従って、各種弾性波特性を計算することができる。

$M = K_{sat} + 4G_{sat}/3$: P波弾性係数

$G = G_{sat}$: せん断弾性係数

$V_p = (M/\rho)^{1/2}$: P波速度

$V_s = (G/\rho)^{1/2}$: S波速度

$\rho = \phi \rho_f + (1-\phi) \rho_s$: 密度

ここに、

ρ_s : 鉱物密度

ρ_f : 間隙流体(ここでは水)の密度。

4. 堆積性軟岩への適用

砂質頁岩モデルの堆積性軟岩への適用性を評価するために、ここでは、1) 弾性波速度から得られる弾性係数と間隙率の関係をベースにモデルの適合性を評価するとともに、適合モデルを用いて予測した間隙率と粘土含有率の実測データとの比較を行った。さらに、

2) 弾性波速度から推定される変形係数(以後、動的ヤング率と呼ぶ)と静的な三軸圧縮試験で得られる変形係数(以後、静的ヤング率と呼ぶ)のモデル化について検討を行った。

(1) 弾性波特性のモデル化

図-1に示す5種類のデータのうち砂質シルト岩1の場合、P波速度(V_p)とS波速度(V_s)の検層データはあるものの室内試験での密度、間隙率、粘土含有率のデータが少ない。そこで、ここでは、検層の V_p と V_s 、室内試験での密度、間隙率、粘土含有率のデータが全ての深度範囲で詳細に得られている泥岩、砂質泥岩、砂質シルト岩2、砂岩の4種類のデータを使用して岩石モデルの構築を行い、構築した岩石モデルを砂質シルト岩1の検層データに適用し、予測した間隙率と粘土含有率の値と室内試験データを比較することにより、岩石モデルの適用性の評価を行った。

上記4種類の岩石物性データから求めたP波弾性係数、せん断弾性係数と間隙率との関係図に、砂質頁岩モデルで計算した理論値を重ねた結果を図-3に示す。ここでは、拘束圧を実際の観測深度に相当する0.5, 1.0, 2.0, 4.0MPaの4つの場合に設定し、P波弾性係数(K_{sat})とせん断弾性係数(G_{sat})を計算した。計算に使用した岩石モデルのパラメータを表-1に示す。基本的な物性値は、Mavko et al(2009)⁸⁾に掲載されている値を用いた。これらの図を見ると、P波弾性係数、せん断弾性係数とも、拘束圧を考慮したモデルから予測される値(図中の曲線)が実測値の分布をよくカバーしていることがわかる。つまり、堆積性軟岩の弾性波特性は、粘土含有率(粒度組成)と拘束圧によって主に支配されていることが、このモデルの適用を通じて示されている。

次に、間隙率の代わりに粘土含有率を横軸にとり、弾性係数と粘土含有率の相関におけるモデルと実測データを比較した結果を図-4に示す。砂質泥岩の粘土含有率のばらつきが大きいものの、4種類のデータともモデルと実測データの適合度は高い。

表-1 岩石モデルの計算に使用したパラメータ

n	21	Cordination number
ϕ_{clay}	0.8	Critical Porosity
ν_{clay}	0.35	Poisson's ratio of clay
Kclay	21 GPa	K of clay
Gclay	7 GPa	G of clay
K1	36.6 GPa	K of Quartz
G1	45 GPa	G of Quartz

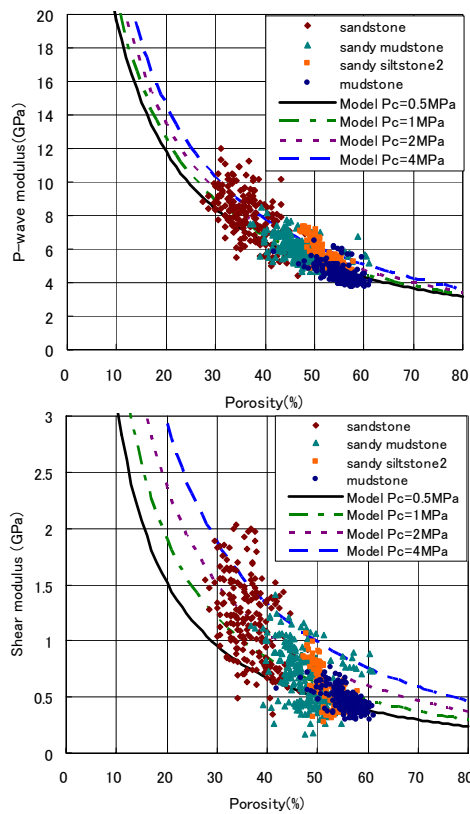


図-3 P 波弾性係数（上）とせん断弾性係数（下）と間隙率との関係（点：実測値，曲線：理論値）

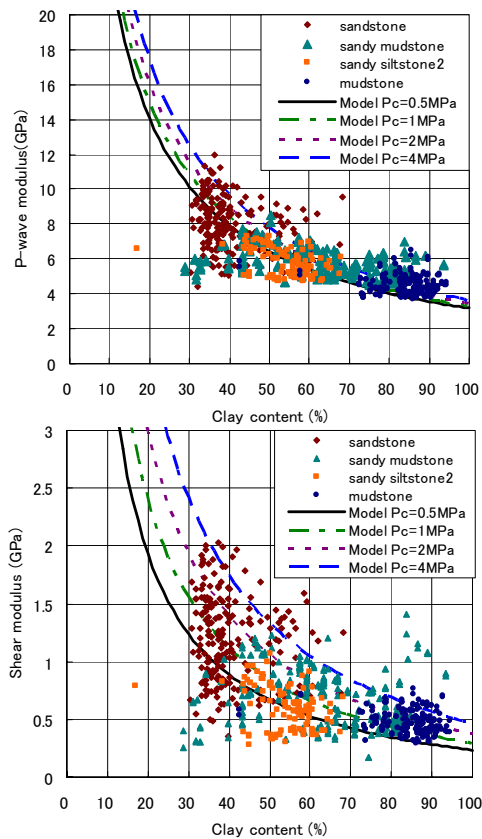


図-4 P 波弾性係数（上）とせん断弾性係数（下）と粘土含有率との関係（点：実測値，曲線：理論値）

上記のようにして4種類の岩石物性データに対して構築した砂質頁岩モデルを残る砂質シルト岩1の検層データに適用した。ここでは、比較を簡単にするために、岩盤の飽和度に関係しないせん断弾性係数だけに着目し、モデルで予測される間隙率と粘土含有率と室内試験で得られた実測値の比較を行った。

上述した(6)式と(7)式から、粘土含有率に関する次式が得られる。

$$C = \frac{1/(G_{dry} + Z) - 1/(G_1 + Z)}{1/(G_2 + Z) - 1/(G_1 + Z)} \quad (9)$$

$$Z = \frac{G_2}{6} \frac{9K_2 + 8G_2}{K_2 + 2G_2}$$

ここで、 G_{dry} がせん断弾性係数であり、サスペンションPS検層の V_s と密度検層の密度値から求めた($G_{dry} = \rho V_s^2$)。また、(7)式における K_2 、 G_2 の計算に必要な拘束圧 P は、実測深度から求めた。その他の岩石モデルの基本パラメータは表1に示す値を使用した。間隙率 ϕ は、 $\phi = \phi_{sh} \cdot C$ より求められる。

モデルにより予測された間隙率と粘土含有率の深度分布を図-5に示す。予測値には、室内試験で得られた実測値を重ねて示したが、両者の一致は極めてよく、ここで使用した砂質頁岩モデルの適用性の高さを示している。

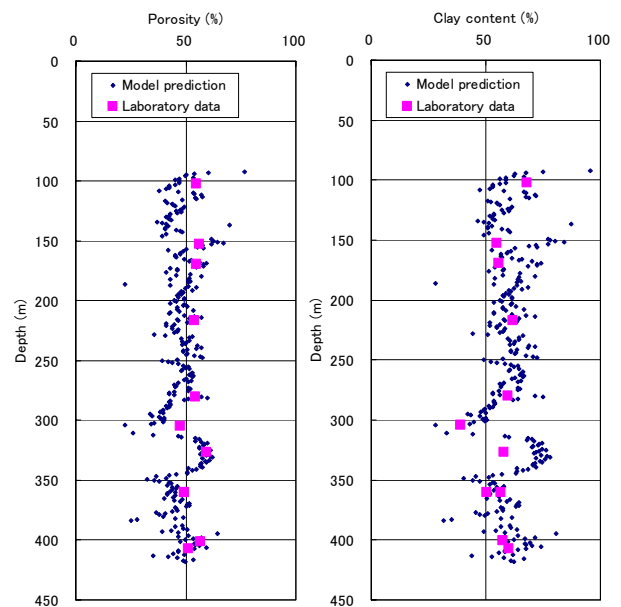


図-5 間隙率（左）と粘土含有率（右）の岩石モデルによる予測値（点）と実測値（四角）の比較

(2) 変形係数のモデル化

図-1に示す5種類のデータのうち、泥岩、砂質泥岩、砂岩については、室内三軸圧縮試験による静的ヤング率が得られている。そこで、砂質頁岩モデルによる静的ヤング率のモデル化について検討を行った。

まず、上記モデルを用いて計算した動的ヤング率と間隙率の関係を実測データに重ねて表示したものを図-6に示す。図-3に示す結果と同様、4種類の拘束圧について計算した結果を示す。計算値と実測値の一致はよく、他の弾性係数同様、モデルの適合性が高いことがわかる。

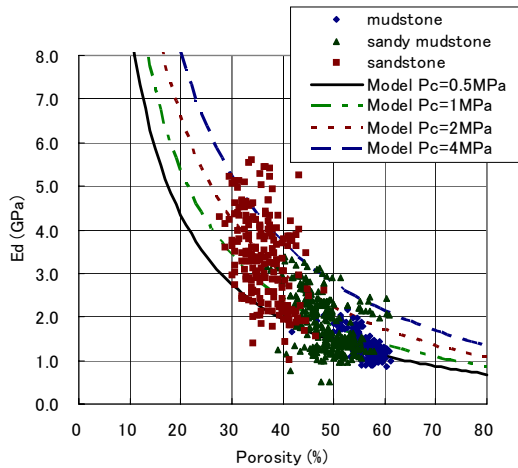


図-6 動的ヤング率と間隙率の関係
(点：実測値，曲線：理論値)

次に、静的ヤング率のモデル化について考える。動的ヤング率が微小歪領域での変形係数であるのに対して、静的ヤング率はやや大きな歪領域での変形係数であり、応力-歪関係の非線形性を考慮する必要がある。砂質頁岩モデルに代表される粒状体モデルでは、拘束圧下にある粒状体の弾性係数を(7)式に示すHertz-Mindlinの式で表す場合が多いが、微小歪領域での弾性波特性のモデル化が目的であるため、ここでは粒子間のすべりは想定されていない。つまり、常に粒子に働くせん断力がせん断強度以下であると仮定している⁸⁾。一方、歪の大きな領域での変形係数を考える場合には、微小歪領域では想定しなかった粒子間のすべりを想定することによりモデル化する。実際には、極端な場合として、粒子間の摩擦が全くない場合、つまりせん断強度がゼロの粒子と上記のようなせん断強度が無限大の粒子が混在する粒状体を考え、Hertz-Mindlinの式を書き換える。全粒子の中でせん断強度無限大の粒子の割合を f とすると、(7)式のせん断弾性係数を、

$$G_2' = \frac{2+3f-\nu_{clay}(1+3f)}{5(2-\nu_{clay})} \left[\frac{3n^2(1-\phi_{clay})^2 G_{clay}^2}{2\pi^2(1-\nu_{clay})^2} P \right]^{1/3} \quad (10)$$

と表すことができる⁸⁾。体積弾性率には変化はないと考えるので、体積弾性率は(7)式の K_2 を使用する。

(7)式に、(10)式に定義するせん断弾性係数を使用して、静的ヤング率を計算した結果を、実測データに重ねて示したものを図-7に示す。計算では、上記 f を0.005とした。この値は、固結度の低い堆積性軟岩に対する値としては妥当な値であると考えられる。その他のパラメータは、表1に示す値を使用しているが、配位数については、粒子間にすべりが発生する場合、粒子間の接点数はすべりが発生しない場合に比べて少なくなると想定されるので、すべりの無い場合に比べて小さい値($n=9$)を使用している。

実測データの場合、動的ヤング率は静的ヤング率に比べ、砂岩の場合、拘束圧の影響が大きく、2倍から5倍程度、砂質泥岩と泥岩の場合には、3倍程度の大きさとなっているが、拘束圧を考慮したモデルによってほぼ説明できていることがわかる(図中の曲線)。図-8は、動的ヤング率の実測データからこのモデルを用いて静的ヤング率を予測した結果を間隙率の関係として表したものである。砂岩、砂質泥岩、泥岩を1つのモデル

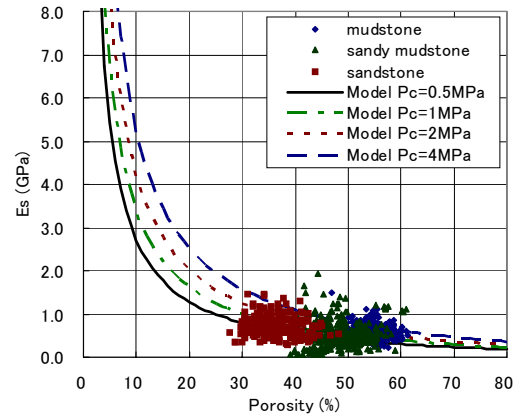


図-7 静的ヤング率と間隙率の関係
(点：実測値，曲線：理論値)

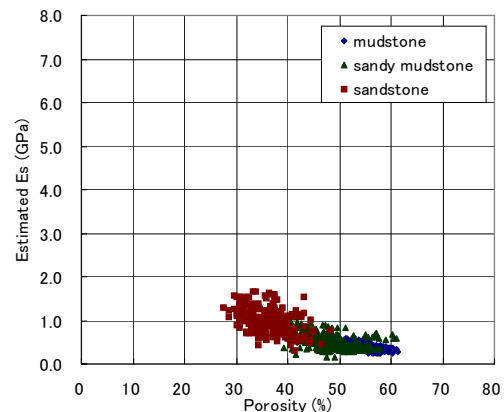


図-8 動的ヤング率から推定した静的ヤング率の間隙率との関係

で表しているため、砂岩と泥岩については、実測値と若干の差が認められるが、概ねよい一致を示していることがわかる。つまり、ここで提案した岩石モデルを用いることにより、弾性波速度から得られる微小歪領域での変形係数（動的ヤング率）から歪の大きい領域での変形係数（静的ヤング率）を推定できる可能性が高いことが確かめられた。

5. まとめと今後の課題

堆積性軟岩の岩石モデルの構築を目的に、国内の堆積性軟岩（新第三紀砂質泥岩）で取得された検層データと岩石コアサンプルの室内試験データを用いて、粒状体モデルの1つである砂質頁岩モデルの適用性を評価した。評価に当たっては、弾性波特性と変形係数に着目し、実測データとモデルによる計算値を比較検討した。

その結果、ここで対象とした堆積性軟岩の弾性波特性は、サイトによらず、粒度組成（粘土含有率）と拘束圧によって主に支配されており、その両特性をモデル化できる砂質頁岩モデルを用いて一般化できる可能性が高いことが確かめられた。また、歪の大きい領域での変形係数（静的ヤング率）についても、粒子間のすべりの有無をモデルに取り込むことによって表現できる可能性があることがわかった。

今後は、堆積性軟岩については、さらに適用事例を増やしモデルの確度を高めるとともに、他種軟岩への拡張性についても検討を行いたいと考えている。

謝辞：本研究で使用したデータは、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により、財団法人深田地質研究所が実施した「平成18/19年度知的基盤創成・促進研究開発事業／地下利用・開発のための基盤技術としてのロックフィジックスの研究開発」で収集したデータの一部である。

参考文献

- 1) 高橋亨・田中莊一：ロックフィジックスをベースにした物理探査データの解釈技術の研究－岩石物性データの収集と予備的な岩石モデル解析－，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2008.
- 2) 日本材料学会：岩の力学，丸善，東京，1993.
- 3) 京都市：京都盆地の地下構造に関する調査報告書，京都市，2001.
- 4) 藤原広行・松山尚典・山水史生：強震動評価のための深部地盤構造モデルに関する基礎的検討（その2），日本地球惑星科学連合大会予稿集(CD-ROM)，2007.
- 5) Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. : Quantitative seismic interpretation, Cambridge University Press., 2005.
- 6) Dvorkin, J., Mavko, G. and Mukerji, T. : Rock physics reservoir characterization – Approaches and Methods Tutorial -, Stanford University, S150-006, 2002.
- 7) Marion, D., Nur, A., Yin, H. and Han, D. : Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures, *Geophysics*, **57**, 4, 554-563, 1992.
- 8) Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J. : The rock physics handbook, second edition, Cambridge University Press, 2009

STUDY ON ROCK PHYSICAL INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATA (PART II) - ROCK PHYSICS MODELING OF SOFT SEDIMENTARY ROCKS -

Toru TAKAHASHI and Soichi TANAKA

To study the rock physics model for soft sedimentary rocks which are widely distributed in Japan, the binary sand/shale mixture model as a granular model is applied to the well logs and laboratory test data of core samples obtained in Neogene sandy mudstone. In this study elastic and deformation moduli of the rocks are modeled and compared with the measurement data. The study results reveal that elastic moduli of the soft sedimentary rocks are controlled mainly by grain size distribution and confining pressure, and can be modeled with the sandy shale model which can represent both parameters. The deformation moduli for larger strain levels can be represented with the same model including the slip between grains.