

地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした 解釈技術に関する研究（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深田地質研究所

Study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications (Part II)
- Rock physics modeling of soft sedimentary rocks -

TAKAHASHI Toru¹ and TANAKA Soichi¹

¹Fukada Geological Institute

要旨：国内に広く分布し地盤工学上重要な堆積性軟岩の岩石モデルの構築を目的に、砂質泥岩での速度検層データと室内試験データを用いて既往の岩石モデルの適用性を評価した。堆積性軟岩の特徴である物性の粒度組成や拘束圧依存性のモデル化に適した二粒子岩石モデルを適用して、弾性波特性の間隙率、粘土含有率、拘束圧依存性について予測値と実測値を比較した。その結果、二粒子岩石モデルの砂質頁岩モデルは、モデルによる予測値と実測値が非常によく一致し、堆積性軟岩の岩石モデルとしての適用性の高さを示した。

キーワード：ロックフィジックス、物理探査、堆積性軟岩、岩石モデル

Abstract: To make and evaluate rock physics models for a soft sedimentary rock which is a very important rock in geotechnical applications because it is widely distributed in Japan, existing rock physics models have been applied to the velocity logs and laboratory test data for sandy mudstones. Main features of a soft sedimentary rock of its dependency on the grain size and confining pressure are modeled with the bimodal mixture model and predictions of porosity and clay contents for the elastic constants are compared to the observed ones. This comparison reveals very good agreement of both data and high applicability of the sandy shale model of the bimodal mixture model to a soft sedimentary rock.

Keywords: rock physics, geophysics, soft sedimentary rock, rock physics model

1. はじめに

筆者達は、地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開始した（高橋・田中，2007；以降“前報”と呼ぶ）。研究開始に当たりまず、研究に必要な

なインフラとして各種岩盤の物理探査データと工学特性を集めたロックフィジックスデジタルライブラリーと呼ぶデータベースを構築した（金子・高橋，2008）。さらに、収集したデータを用いて岩石モデルの予備的な解析を行った。予備解析では、国内の代表的な岩種として、堆積性軟岩と花崗岩を取り上げ、既往の岩石モデルの適用性について検討を行った。

本報では、前報の予備解析を受けて、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、既往の岩石モデルをベースにしたさらに詳細な検討を行ったので、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。都市部では、各種土木建築構造物の基礎として、あるいは最近では大深度地下利用や強震動予測を含む地震防災上もその特性を精度よく把握することが求められている。堆積性軟岩の代表である泥岩は、核廃棄物の地層処分場としての要件を満たす重要な岩盤でもあり、また最近では帯水層への二酸化炭素の地中隔離を行う場合の帽岩としてもその特性の把握の重要性が指摘されている。

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（例えば、日本材料学会（1993））、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（例えば、京都市、2001）。従って、今後、国内の堆積性軟岩地域での各種調査で利用される物理探査データを解釈する場合に、それらの特性を一般化した岩石モデルが構築されればその有用性は極めて大きいと考えられる。

前報の予備解析では、国内の新第三紀砂質泥岩

に属する4種類の岩盤で取得されたサスペンションP S検層によるP波、S波速度と室内試験データを用いて、粒状媒質モデルの1つとして提案されている Friable Sand Model (Avseth et al., 2005) の適用性を評価した。その結果の要点を示す図として、弾性波特性（P波弾性率（密度×P波速度の二乗）、剛性率（密度×S波速度の二乗）、以後この表現を使う）と間隙率の関係について、実測データとモデルによる予測値を重ねた相関図を図1に示す。図からわかるとおり、Friable Sand Model は、実測データの大局的な特徴をよく表現できることが確かめられた。

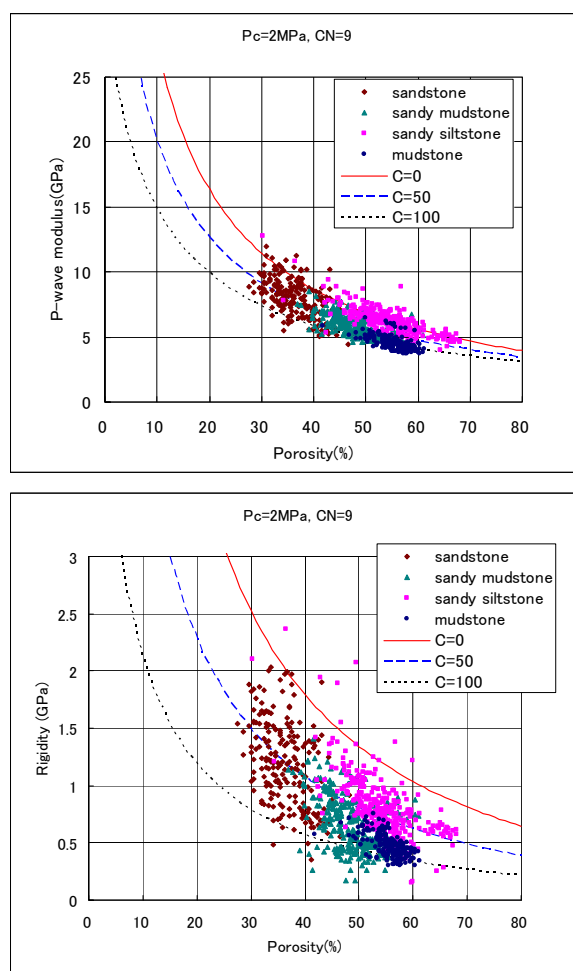


図1 弾性波特性と間隙率の関係図

Friable Sand Model の適用結果：図中の曲線がモデルの予測値（C：粘土含有率（%））

しかしながら、このモデルは、粘土含有率を一定とするモデルであり、図中の予測値を示す各曲線も一定の粘土含有率 (0, 50, 100%の3種類) の値である。一方、実測データは、その粒度分布から、砂岩、砂質泥岩、砂質シルト岩、泥岩の順に粘土含有率が増加しており、予測曲線とは一致しない。従って、Friable Sand Modelはこの種の岩盤の特性を完全に表現できるモデルではないことがわかる。

既往の岩石モデルの中で、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が提案されており、二粒子岩石モデル (Bimodal Mixture Model) と呼ばれている (Marion et al., 1992, Dvorkin, 2001, Aveseth et al., 2005)。実測データに見られるように、堆積性軟岩は粒度組成に依存して間隙率や諸物性が変化するという特性を有していることから、二粒子岩石モデルの適用性は高いと予想される。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。

3. 二粒子岩石モデル

二粒子岩石モデルでは、岩石を図2 (b)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。このモデルは、頁岩質砂岩や砂質頁岩を表すモデルの1つとして提案されている。図2 (c)は、P波弾性率と間隙率の関係をこのモデルを使って解釈した一例である。ここでは、粘土含有率が自然放射能検層結果をもとにカラー表示されている。粘土含有率が大きいものが暖色系、小さいものが寒色系で表されている。図中の番号は二粒子岩石モデルの番号に対応している。番号①の位置は砂岩を表し、①→②の変化が頁岩質砂岩に対応すると解釈される。つまり、粘土含有率が増加するとともに間隙率が低下し、その結果P波弾性率は増加する。粘土粒子が砂粒子の間隙を完全に埋めた状態が②の状態であり、間隙率が最も小さく、P波弾性率が最も大きくなる。更に粘土含有率が増えると、今度は②→③の変化が生じる。これは砂質頁岩に対応すると

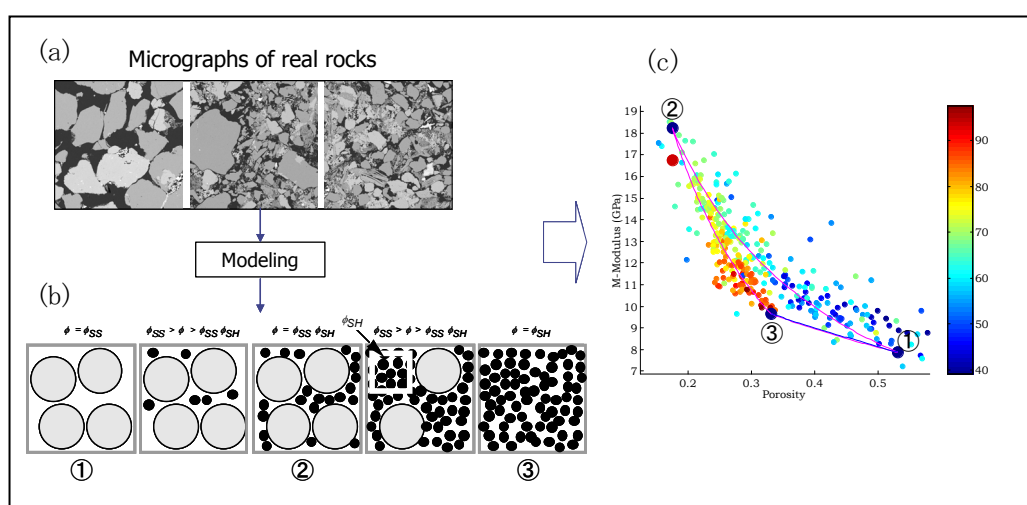


図2 二粒子岩石モデルの概念図 (Dvorkin, 2001)

(a) 砂岩の顕微鏡写真, (b) 二粒子岩石モデル, (c) P波弾性率と間隙率の関係例

解釈される。この場合、粘土粒子の増加に伴い、粘土自身の間隙率の分だけ岩石全体の間隙率が増加し、岩石全体のP波弾性率は低下するという解釈である。

泥岩、シルト岩、砂岩などの堆積性軟岩は、一般に粘土成分の増加とともに間隙率が増加し、弾性波速度や強度などの力学的特性が低下するという特徴を示すため、二粒子岩石モデルのうちの砂質頁岩モデルで表すことができると考えられる。そこで、本研究ではその適用性を評価することにした。以下には、Dvorkin (2001) と小西・東(2008) に従い、二粒子岩石モデルのうちの砂質頁岩モデルについてその詳細を説明する。

3.1 砂質頁岩モデルの粘土含有率と間隙率

図2に示した二粒子岩石モデルのうちの砂質頁岩モデルに相当する部分を抜き出したモデルの模式図を図3に示す。砂質頁岩モデルの場合、図3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1、半径をrとする。また、大粒子、小粒子それぞれ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、

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

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

である。従って、岩石の間隙率は、

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{V_{pore}}{V_{total}} \\ &= \left(\frac{4}{3}\pi r^3 l \phi_{sh} / (1 - \phi_{sh}) \right) / \left(\frac{4}{3}\pi R^3 L + \frac{4}{3}\pi r^3 l / (1 - \phi_{sh}) \right) \quad (2) \\ &= r^3 l \phi_{sh} / ((1 - \phi_{sh}) R^3 L + r^3 l) \\ &= \phi_{sh} / ((1 - \phi_{ss}) / \beta + 1) \end{aligned}$$

で表される。ここに、

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

小粒子(粘土)の体積は、

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

と表されるので、粘土含有率Cは次のように求められる；

$$\begin{aligned} C &= \frac{V_{clay}}{V_{total}} \\ &= \left(\frac{4}{3}\pi r^3 l / (1 - \phi_{sh}) \right) / \left(\frac{4}{3}\pi R^3 L + \frac{4}{3}\pi r^3 l / (1 - \phi_{sh}) \right) \\ &= r^3 l / ((1 - \phi_{sh}) R^3 L + r^3 l) \quad (5) \\ &= 1 / ((1 - \phi_{ss}) / \beta + 1) \\ &= \frac{\phi}{\phi_{sh}} \end{aligned}$$

なお、砂質頁岩モデルでは、砂粒子の間隙以上の体積を粘土粒子が占めているモデルであるため、 $C > \Phi_{ss}$ である。すなわち、粘土含有率は、 $\Phi_{ss} \rightarrow 1.0$ 、間隙率は、 $\Phi_{ss} \cdot \Phi_{sh} \rightarrow \Phi_{sh}$ の間で変化することを想定している。

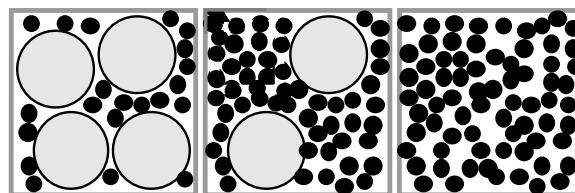


図3 砂質頁岩モデルの概念図

3.2 砂質頁岩モデルの弾性係数

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(Dvorkin, 2001)。二粒子岩石モデルの砂質頁岩モデルでは、Hashin-Shtrikmanモデルのエンドメンバーの硬い側は、間隙率がゼロの場合の

砂粒子とし、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する。従って、ここでは、硬い側のエンドメンバーの弾性係数は、砂粒子の値とし（ここでは石英の値を使用）、軟らかい側のエンドメンバーの弾性係数は、粘土の間隙率を用いて Hertz-Mindlin モデルにより計算する(Mavko et al., 1998)。

硬い側の弾性係数を K_1 , G_1 , 軟らかい側の弾性係数を K_2 と G_2 とすると, Hashin-Shtrikman の下限式により, 粘土含有率 $C (= \Phi / \Phi_c)$ を用いて, 乾燥状態での岩石の体積弾性率 K_{dry} と剛性率 G_{dry} は, 以下の式から求められる (Mavko et al., 1998)。

$$K_{dry} = \left[\frac{C}{K_2 + (4/3)G_2} + \frac{1-C}{K_1 + (4/3)G_2} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_2$$

$$G_{dry} = \left[\frac{C}{G_2 + Z} + \frac{1-C}{G_1 + Z} \right]^{-1} - Z$$

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

ここで, 硬い側の弾性係数 (K_1 , G_1) は, 石英の弾性係数を与え, 軟らかい側の弾性係数 K_2 と G_2 は, Hertz-Mindlin の式を用いて, 以下の式から求める (Mavko et al., 1998)。

$$K_2 = \left[\frac{n^2(1-\phi_{clay})^2 G_{clay}^2}{18\pi^2(1-\nu_{clay})^2} P \right]^{1/3}$$

$$G_2 = \left[\frac{5-4\nu_{clay}}{5(2-\nu_{clay})} \right] \left[\frac{3n^2(1-\phi_{clay})^2 G_{clay}^2}{2\pi^2(1-\nu_{clay})^2} P \right]^{1/3}$$

ここに,

G_{clay} : 粘土の剛性率

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率 K_{sat} を求める (Mavko et al., 1998)。なお, 剛性率は, 飽和による変化はないので, G_{sat} は G_{dry} と等しいとする。

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

$$G_{sat} = G_{dry}$$

ここに,

K_f : 間隙流体 (ここでは水) の体積弾性率

以上のように砂質頁岩の弾性係数 (体積弾性率と剛性率) が得られると, 以下の式によって, 各種弾性波特性を計算することができる。

$$M(\Phi) = K_{sat} + 4G_{sat}/3 \quad : P \text{ 波弾性率}$$

$$G(\Phi) = G_{sat} \quad : \text{剛性率}$$

$$V_p(\Phi) = \text{SQRT}(M(\Phi)/\rho) \quad : P \text{ 波速度}$$

$$V_s(\Phi) = \text{SQRT}(G(\Phi)/\rho) \quad : S \text{ 波速度}$$

$$\rho = \Phi \rho_f + (1-\Phi) \rho_s \quad : \text{密度}$$

ここに,

ρ_s : 鉱物の密度

ρ_f : 間隙流体 (ここでは水) の密度

4. 堆積性軟岩への適用

前報で報告した4種類の新第三紀砂質泥岩は, その特性から国内の代表的な堆積性軟岩の例と考えられるので, ここでは, それらの物性データを用いて, 堆積性軟岩に対する二粒子岩石モデル(砂質頁岩モデル)の適用性を評価する。

4.1 使用データ

検討に使用する4種類のデータは, 国内の異なる3地点の4つの地層で取得されたサスペンションP-S検層によるP波速度 (以後 V_p) とS波速度 (以後 V_s) である。また, 岩石モデル解析に必要な基本物性である密度と間隙率については,

室内の物理試験で取得されたデータまたは密度検層結果から推定されたデータを使用している。図4に4種類のデータの深度分布図を示す。各データが取得された岩種は、図中の粒度分布図の凡例に示した。P波速度で1500m/sから2200m/s前後、S波速度で400m/sから1000m/s前後の値を示していることがわかる。密度と間隙率については、砂質シルト岩(sandy siltstone)の場合、室内試験のデータが少ないため、密度検層で得られた密度値とその密度値から鉱物密度を仮定して求めた間隙率も示している。

岩石モデル解析に必要な粘土含有率は、室内試験で得られている粒度分布から求めた。室内試験では、礫、砂、シルト、粘土のそれぞれの重量比が測定されているので、ここでは便宜的に、シルトの1/2と粘土の割合を加算した値を粘土含有率とした。図5に粘土含有率の深度分布図を示す。砂質泥岩の粘土含有率の分布のばらつきが大きいものの、それぞれの岩種の特徴を表した分布となっていることがわかる。

4.2 砂質頁岩モデルの適用

4種類のデータのうち砂質シルト岩の場合、 V_p と 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ほぼ全ての深度範囲で得られている泥岩、砂質泥岩、砂岩の3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の速度検層データに適用、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うことにした。

4.2.1 岩石モデルの構築

岩石モデルを構築する場合、適用する岩石(岩

盤)の弾性波特性(弾性波速度や弾性係数)と間隙率の関係をベースにするのが一般的である。そこで、泥岩、砂質泥岩、砂岩3種類のデータのP波弾性率と剛性率の間隙率との相関および深度分布を求め、図6に示す。粒度分布にばらつきの見られた砂質泥岩もこれらの関係ではばらつきも少なく、質の高いデータであることがわかる。上述したとおり、粘土含有率の少なくなる泥岩、砂質泥岩、砂岩の順に間隙率も小さくなっていることが明らかである。

一方、深度分布図を見ると、深度、すなわち拘束圧が増加するに従い、弾性係数が増加していることがわかる。つまり、間隙率との相関図のデータの分布の広がりには、粒度組成に加えて拘束圧の違いによる弾性係数の違いも現れていることがわかる。従って、構築する砂質頁岩モデルでは、粒度分布(粘土含有率)とともに、物性の拘束圧依存性を表現できることが重要となる。砂質頁岩モデルでは、軟らかい側のエンドメンバーを設定する際に、Hertz-Mindlinモデルを使用することにより、拘束圧をモデルに取り込むことができる。

図6に示すデータに砂質頁岩モデルを適用した結果を図7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波弾性率(K_{sat})と剛性率(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。ここでは、(6)式の計算において、硬い側のエンドメンバーとして石英の物性値、軟らかい側のエンドメンバーとして間隙率を0.8とした粘土の物性値を使用し(7)式で計算した K_2 と G_2 を用いた。これらの物性値は、Mavko et al. (1998)に掲載されている値を用いた。ここで注意すべき点は、配位数を21に設定している点である。配位数は、粒子間の接点数を表すパラメータであるが、通常の砂岩のモデルでは、間隙率

が大きくなると値は小さくなる。一般に使用される経験式 (Dvorkin, 2001)

$$n = 20 - 34\phi + 14\phi^2 \quad \text{----- (9)}$$

を用いると、 Φ が0.8の場合、配位数 n は、1.76となる。しかしながら、配位数の物理的意味は、粒子間の接点数であるため、粒子数が増加すれば当然増加すべき値である。上記(9)式も、間隙率が小さくなる、つまり砂粒子の数が増加する場合には配位数が大きくなることを示している。砂質頁岩モデルの場合には、間隙率が大きくなると粘土粒子の数が多くなるのであるから、配位数も大きく設定する必要がある。そこで、ここでは、臨界間隙率に対応する粘土の配位数として(9)式の最大値に匹敵する21を使用した。配位数を2前後の値に設定するとモデルが実際の観測データを説明できず、21に設定すると最もよく説明できることからこの考え方の妥当性が示されていると考える。砂質頁岩モデルのような場合に、配位数と間隙率の間どのような関係式を使用すべきかについては今後の検討課題である。

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8に示す。粘土の間隙率(Φ_{sh})を0.8としているので、(5)式より粘土含有率は間隙率の値の1.25倍の値となる。上述したとおり、砂質泥岩の粘土含有率のばらつきが大きいものの、3種類のデータとも、モデルと実測データの適合度は非常に高いといえる。

拘束圧に関するモデルの適合度を見るために、3種類の実測データの深度をもとに有効応力(土被り圧)を求め、モデルによる弾性係数の予測値との比較を行った結果を図9に示す。実測データについては、0.75MPa刻みに、0.0-0.75, 0.75-1.5, 1.5-2.25, 2.25-3MPaに分けて表示した。この結果も予測値と実測値の適合度の高さを示しており、

実測データに適合度の高いモデルが構築できたことを示している。

4.2.2 岩石モデルの砂質シルト岩への適用

上述のように3種類の堆積性軟岩で得られた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剛性率だけに着目し、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} が実測剛性率であり、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に示す値を使用している。間隙率 Φ は、 $\Phi = \Phi_c \cdot C$ より求められる。

計算に使用した実測 V_s と密度の深度分布と、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10に示す。予測値には、室内試験で得られた実測値も重ねて示した。図4に示した各データの深度分布図の比較結果からも推測されたとおり、予測値と実測値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。すなわち、堆積性軟岩の特徴である深度依存性を含む粘土含有率と間隙率の違いによる弾性波特性の変化を、二粒子岩石モデルの砂質頁岩モデルでモデル化できる可能性が確かめられた。

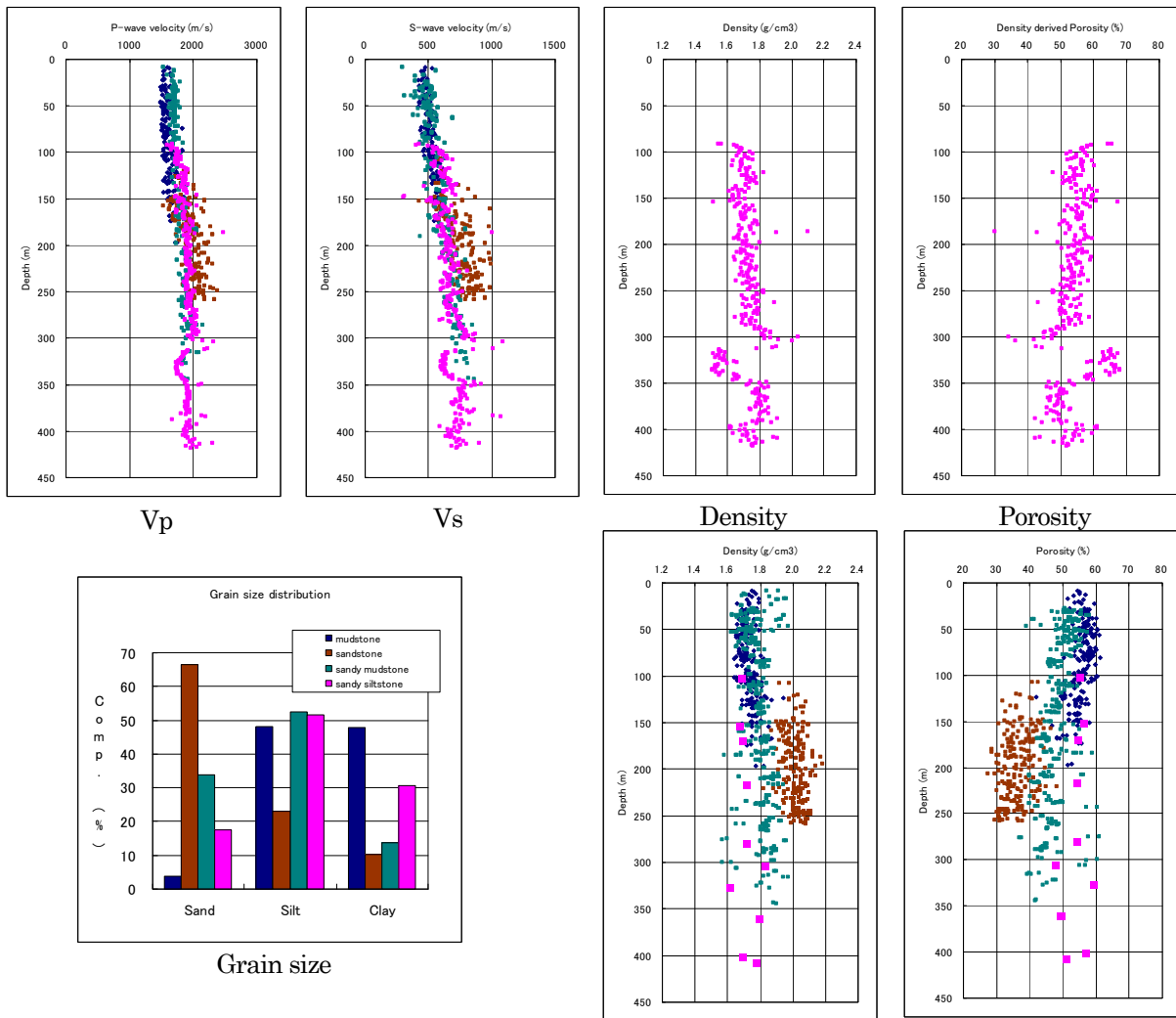


図4 解析に使用した4種類の堆積性軟岩の物性 (Vp, Vs, 密度, 間隙率) の深度分布 (上段: 検層データ, 下段: 室内試験データ)

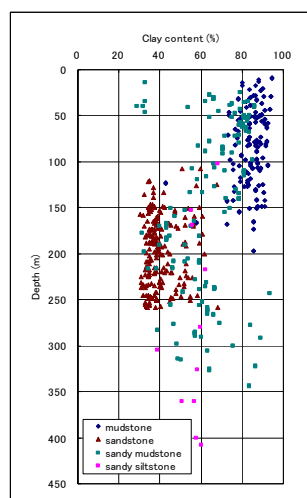


図5 解析に使用した4種類の堆積性軟岩の粘土含有率の深度分布

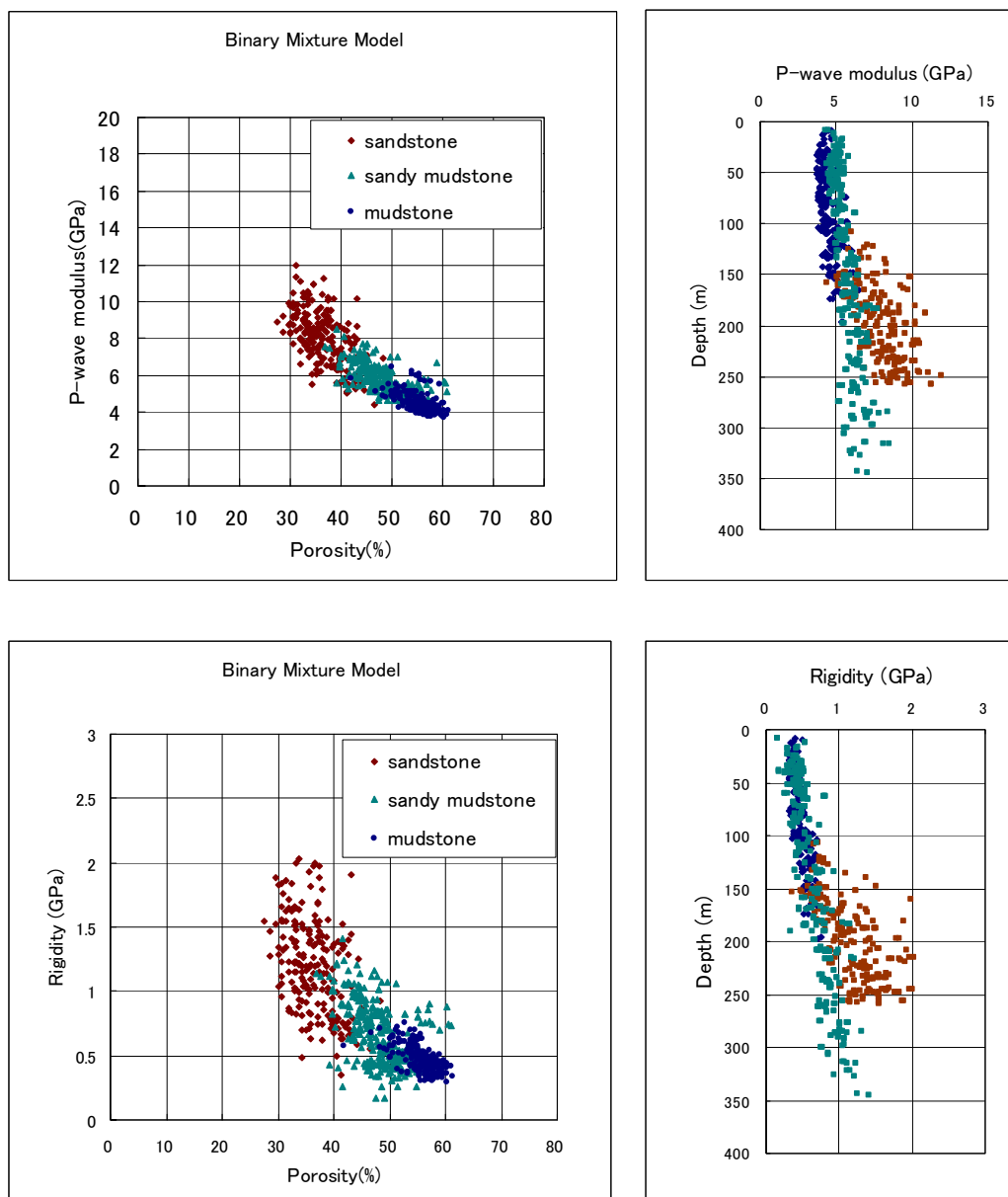


図6 モデル構築に使用した3種類の堆積性軟岩の弾性係数と間隙率および深度分布
(上段：P波弾性率，下段：剛性率)

表1 岩石モデル解析に使用したパラメータ

n	21	Cordination number
ϕ clay	0.8	Porosity of clay
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	Kquartz
G1	45 GPa	Gquartz

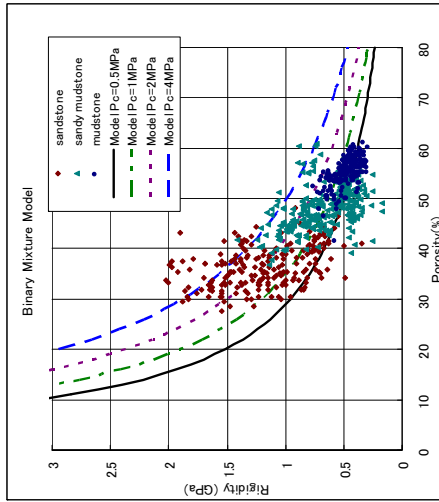
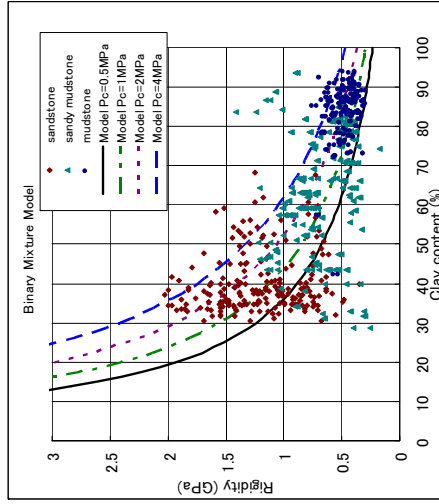
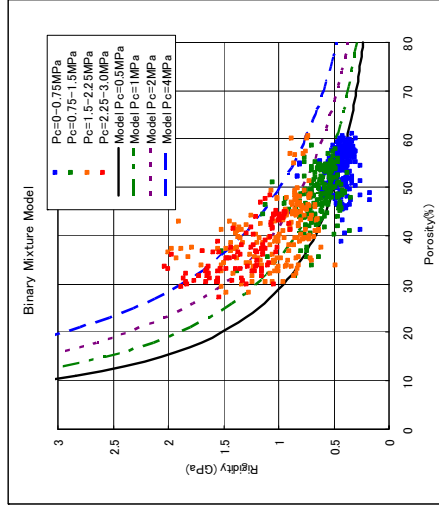
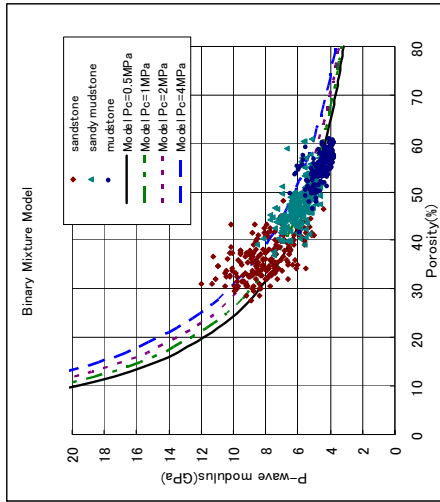
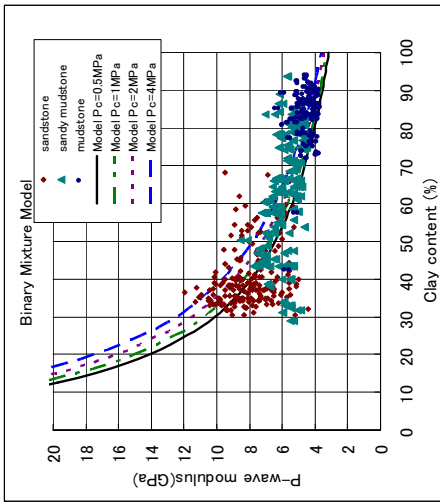
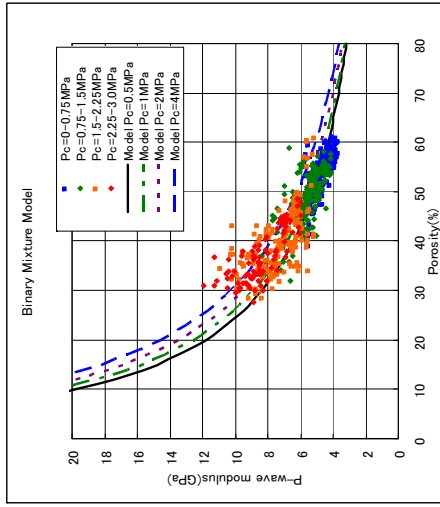
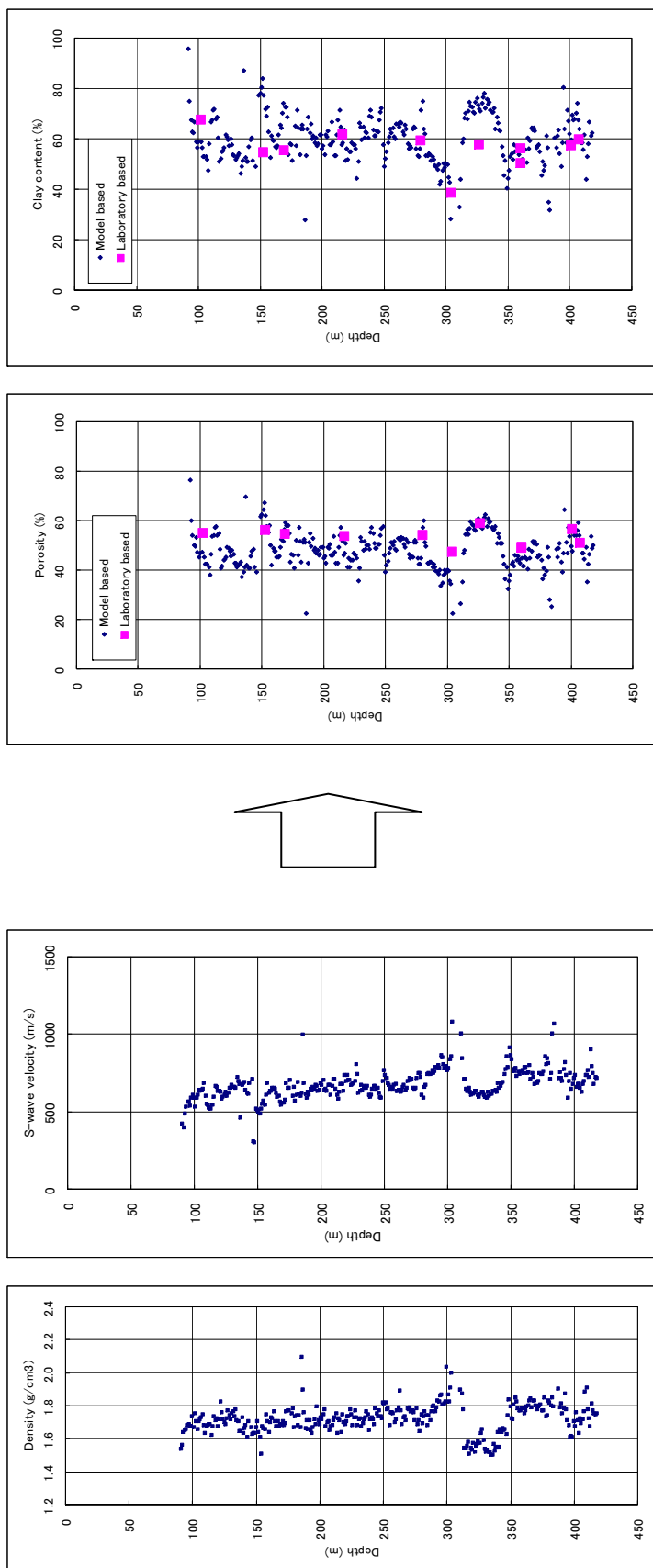


図7 岩石モデル予測値と実測値の比較(1)
弾性係数と間隙率
(上段：P波弾性率，下段：剛性率)

図8 岩石モデル予測値と実測値の比較(2)
弾性係数と粘土含有率
(上段：P波弾性率，下段：剛性率)

図9 岩石モデル予測値と実測値の比較(3)
弾性係数と間隙率の拘束圧依存性
(上段：P波弾性率，下段：剛性率)



Clay content

Porosity

Vs

Density

Comparison of predictions and measurements

Inputs to the model

図10 砂質シルト岩への岩石モデルの適用結果
(左側：入力した観測データ，右側：モデルによる予測結果と室内試験結果の比較)

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（砂質泥岩類）で取得された速度検層データに粒状体モデルの1つとして提案されている二粒子岩石モデルのうちの砂質頁岩モデルを適用し、その適用性を評価した。堆積性軟岩は、粒度組成と拘束圧によってその諸特性が変化することが知られている。二粒子岩石モデルは、粘土含有率の増減により間隙率が増減し、その結果として弾性波特性が変化するモデルであり、粘土成分のモデルとして Hertz-Mindlin モデルを使用することによって拘束圧依存性を表現できるため、堆積性軟岩のモデル化に適していると考え適用した。その結果、深度依存性を含む粘土含有率と間隙率の違いによる弾性波特性の変化を表現できるモデルを構築することができ、実測データを説明できることが確かめられた。

今回の検討結果に限れば、堆積性軟岩の少なくとも弾性波特性は、サイトにはよらず、主にその粒度組成（粘土含有率）と拘束圧によって支配されており、その両特性をモデル化できる二粒子岩石モデルの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。しかしながら、今回の検討に使用したデータは極めて限定されたデータであるため、今後より一般的な軟岩の岩石モデルの構築およびその適用の拡大を図るためには、さらに以下のような事項についての検討が必要であると考えている。

- ・サイト、堆積年代、深度（拘束圧）の異なる堆積性軟岩データへの適用と評価
- ・弾性波特性以外の諸特性、例えば一軸圧縮強さ等へ拡張性の評価
- ・風化軟岩や火山性軟岩への適用と評価
- ・透水性のモデル化への拡張の可能性の検討

謝辞

本研究で使用した堆積性軟岩の物性データは、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。データの取得条件の詳細について応用地質株式会社の岩本健氏にご教示いただいた。ここに記して感謝する。

参考文献

- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. (2005): Quantitative seismic interpretation, Cambridge University Press.
- Dvorkin (2001): Technical notes on rock physics
- 金子誠, 高橋亨(2008): ロックフィジックスデジタルライブラリー, 深田地質研究所年報, No. 9
- 小西千里, 東宏幸 (2008): 二粒子モデルを用いた地盤の弾性係数の推定, 物理探査学会第 118 回学術講演会講演論文集, 13-16.
- 京都市(2001): 京都盆地の地下構造に関する調査報告書.
- Marion, D., Nur, A., Yin, H., Han, D. (1992): Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures, Geophysics, 57, 4, 554-563.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J. (1998): The rock physics handbook, Cambridge University Press.
- 日本材料学会 (1993): 岩の力学, 丸善
- 高橋亨, 田中 莊一(2007): 地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究—岩石物性データの収集と予備的解析—, 深田地質研究所年報, No. 8, 109-129.