

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 ー岩石物性データの収集と予備的な 岩石モデル解析ー

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

ロックフィジックスをベースに物理探査データを解釈する技術の研究や適用は、石油・ガス探査分野では積極的に行われているが、岩盤工学分野では対象する岩種の多様性に起因したモデル化の困難さ、研究に使える質の高い岩石物性データが十分に整っていないなどの理由で、未だ十分な研究・適用が進んでいないのが現状である。そこで、筆者達は、国内の様々な岩種について、物理探査データを調査、入手可能なものは入手し、データベース化するとともに、岩石のモデル化の研究を始めた。本稿では、これまでに収集した岩石物性データの一覧を示すとともに、収集したデータを使用した予備的な解析として、国内の代表的な岩種である堆積軟岩と花崗岩を取り上げ、既往の岩石モデルの適用性を評価した結果を示す。

Key Words : geophysical data, rock physics, physical properties of rocks, data base

1. はじめに

ロックフィジックスは、地盤のミクロなモデルに基づいて、弾性波速度や強度などの力学的な特性、あるいは間隙率や透水係数などの水理学的な特性といったマクロな特性を理解し説明しようとする学問体系である。ロックフィジックスをベースに物理探査データを解釈する技術の研究や適用は石油・ガス開発分野で積極的に行われている¹⁾。石油・ガス開発分野が対象とする岩石は主に砂岩などの堆積岩であり、適用される物理探査手法も反射法地震探査に限られている。そのため、ロックフィジックスの研究でモデル化が進んでいる岩石も泥質砂岩がほとんどであり、利用されている物性も弾性波速度、特に、P波速度に関する物性に限られているのが現状である。

国内での土木建設分野や地盤工学分野での適用を考えた場合、対象とする岩石は砂岩に限らず、堆積年代の若い泥質岩などの軟岩から割れ目を含んだ花崗岩のような硬岩まで各種の岩石を対象とする必要がある。また、土木建設分野での浅層調査では、P波の地震探査だけでなく、S波の地震探査も多く利用されるし、電気探査や地中レーダ探査などの電気電磁法探査も利

用されるために、多様な物性データを取得することが可能である。そのため、ロックフィジックスの土木建設分野や地盤工学分野での利用を図るためには、各種岩石を対象に各種の物性を利用可能な新しい技術体系に発展させていく必要がある。

物理探査結果の解釈技術の研究は国内でも最近積極的に進められるようになってきているが、ロックフィジックスに基づいた研究例はあまり多くない。ロックフィジックスを用いた研究を行うためには、物理探査や検層で得られる物性データとともに工学的に重要な力学的、水理学的特性などの他の物性データが必要であるが、一般に公開されたそのような物性に関する整備されたデータベースは見当たらないのが現状である。

そこで、筆者達は、まず、ロックフィジックスの研究に利用可能なインフラとして、各種岩石物性に関するデータベースを構築することを考え、データの収集・整理を開始した。本稿では、これまでに収集整理した岩石物性データを一覧表として示すとともに、収集したデータを使って実施した既往の岩石モデルの適用性に関する予備的な検討結果を紹介する。

2. 物理探査結果の解釈技術の現状

物理探査は、弾性波速度や比抵抗という物性を通して地下の状態を可視化する技術であり、資源探査を始め、環境、防災、土木建設分野など数多くの分野で利用されている。しかしながら、物理探査で直接得られる物理量は、弾性波速度や電気比抵抗などの物性であり、地下の流体の動きを支配する地層の間隙率や透水性、構造物の施工性や支持力の評価に必要な力学特性など、直接事業に役立つ工学的特性ではない。物理探査から得られる物性を直接事業に役立つ工学的な特性値に変換することができれば、物理探査で得られた地下の物性モデルをそのまま事業に生かすことができ、その有用性は飛躍的に増大する。そのため、物理探査データを工学的に有効な特性値（工学量と呼ぶ）に変換するための解釈技術に関する研究は、近年特に重要視され、積極的に進められている^{2),3),4)}。

物理探査データを工学量に変換する手法としては、大きく分けて次の3つの手法が用いられている。

(1) 探査データと工学量の相関関係を利用する方法

この手法は、同じ調査地で得られた物理探査や検層による物性データと現位置岩盤試験やボーリングコアの室内試験等によって得られる工学量との相関関係を用いて、物性データから工学量を推定する手法である。物性データと工学量との相関図を作成し、回帰式を求めるだけの簡便な手法であるため、広く利用されている。しかしながら、データが少ない場合には関係式の信頼性が低下すること、また、その調査地内のデータが取得された岩種だけにしか使えないという制限がある。

(2) 経験式を利用する方法

物理探査で得られる物性と工学的に重要な力学的あるいは水理学的特性との関係についての経験式は数多く提案されている⁵⁾。比抵抗と間隙率の経験式であるアーチの式⁶⁾、弾性波速度と間隙率の経験式である時間平均公式^{7),8)}はそれらの中でも特に有名で広く利用されている。経験式も、実際のデータの関係解析から求められているが、導出までに多くのデータが利用解析されているためその信頼性が高いこと、また物理的な意味もある程度理解できるため、上述した相関解析による方法よりもその汎用性

が高い。しかしながら、原理的には、経験式が導出された岩種や条件を超えて利用することは難しい。そのため、適用可能な岩種や条件を広げた改良式も数多く提案され、利用されている。表面伝導を考慮した拡張アーチの式⁹⁾や時間平均公式を拡張した Raymer-Hunt-Gardner の式¹⁰⁾等の拡張式はよく知られている。

(3) ロックフィジックスに基づく方法

物性データを工学量に変換する手法として最も汎用的に利用することができ、信頼性が高い手法がロックフィジックスをベースにした手法である。物理的な岩石モデルに基づいてマクロな特性である物性と工学量を計算することができるので、両特性間の精度の高い変換が可能となる¹¹⁾。しかしながら、現状、砂岩や泥質砂岩についてしかモデル化の研究が進んでいないため、それ以外の岩種については今後の研究を待たなければならない。

3. ロックフィジックス

ロックフィジックスは、地盤のミクロなモデルに基づいて、弾性波速度や強度などの力学的な特性、あるいは間隙率や透水係数などの水理学的な特性といったマクロな特性を理解し説明しようとする学問体系である。例えば、図-1に示すように、岩石を砂や粘土の粒子の集合体としてモデル化し、粒子間の相互作用を定式化することによって、粒子レベルのミクロな特性から、岩石全体のマクロな特性である弾性波特性を求め、それらの特性間の関係を合理的に説明する。図-1の右図は、P波弾性波特性と間隙率との関係を示した相関図であるが、実データを左図に示した岩石モデルを用いて合理的に説明している例である¹¹⁾。

ロックフィジックスの研究や適用は、これまで主に、石油・ガス開発分野で積極的に行われてきており、それらの重要な貯留岩である砂岩については各種の岩石

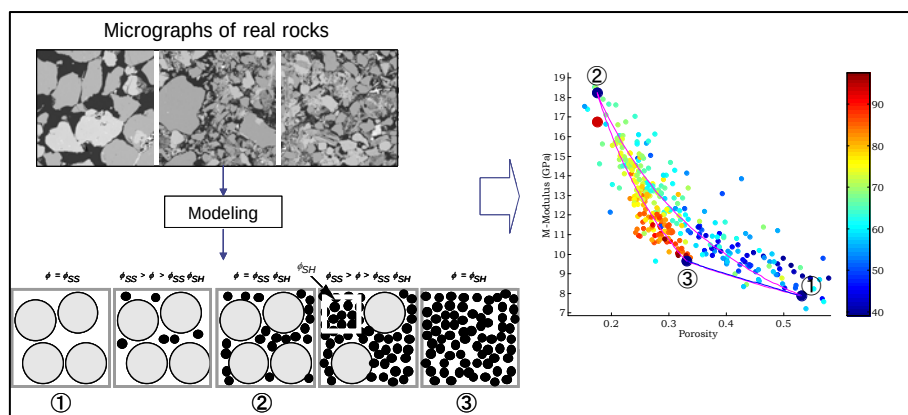


図-1 ロックフィジックスの概念¹¹⁾

モデルが提案されている。この分野では、反射法地震探査が主要な探査手法であるため、探査で得られるP波速度に関する弾性波特性を説明する岩石モデルの研究が行われてきた。特に、P波速度と間隙率との関係は、岩石モデルを構築する上での基本的な関係である。図-2は、P波速度と間隙率の関係を使って、これまでに提案されている主要なモデルをまとめたものである¹²⁾。粒子間の膠着度や粘土粒子の存在形態などにより、大きく5種類のモデルに分けられている。

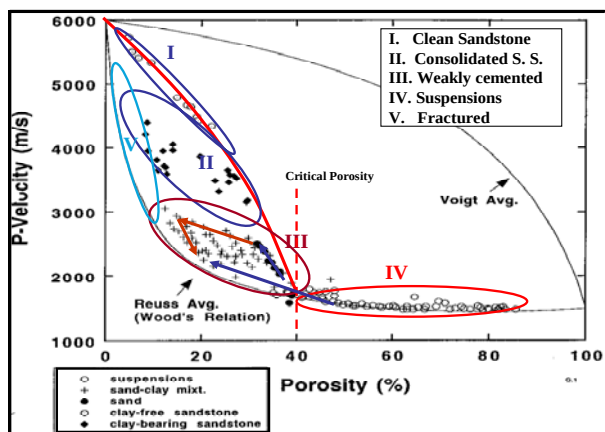


図-2 岩石モデル¹²⁾

これらのモデルのうち、粒子間の膠着度の小さいモデル (weakly cemented model) の1つとして提案されている Friable Sand Model を用いて、メキシコ湾、北海、および日本の泥岩や泥質岩をモデル化し、P波弾性波特性である圧縮弾性率とS波から得られる剛性率の間隙率との

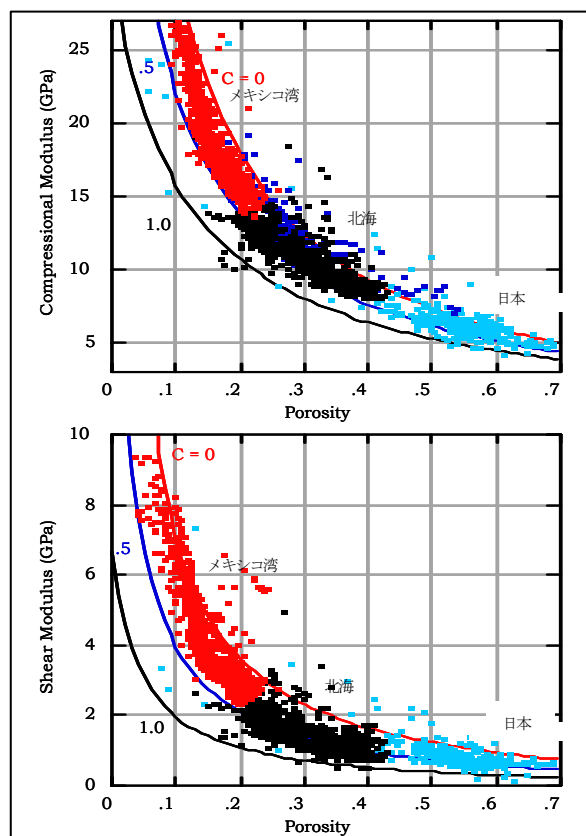


図-3 岩石モデルの適用例¹³⁾

関係を求めた結果が図-3である¹³⁾。図中の点が各地区での検層データから得られたそれぞれの値であり、実線がモデルに基づく計算値である。

3本の実線は、粘土含有率をそれぞれ、0,50,100%とした場合の計算値である。データの得られた地域や深度が異なるにもかかわらず、3地区のデータが1つの岩石モデル (Friable Sand Model) によって説明されていることがわかる。

4. 岩石物性データの収集

地盤工学分野で利用される岩石物性データは、主にボーリングコアの室内岩石試験や検層によって得られる。そこで、本研究でも、国内の室内岩石試験、検層データに関わる文献や資料、インターネット公開情報などを調査し、研究に利用可能なデータを入手した。

室内岩石試験データについては、国内の地質、岩石、室内試験に関する公開、未公開データを調査した。公開データのうち、本研究に利用可能な岩石物性データを含む報告書や地質・岩石のデータベースのうち、インターネットに公開されているもの11件、出版物として公開されているもの15件、論文4件をリストアップし、その中から、データの質が高く、多種の岩石のデータを含むものを選定しデータベース化した。未公開データについても、国内の地質・地盤調査に関わるデータを調査し、ロックフィジックスの研究に利用可能な質の高い5件のデータを入手した。データベース化した室内岩石試験データの一覧を表-1に示す。

検層データについても同様に、関連する文献、資料、インターネット公開情報などを調査し、利用可能なデータを入手した。それに加えて、利用可能な既存ボーリング孔を使って研究に必要な物性の取得ができる4種類の検層 (サスペンションPS、電気 (ノルマル)、密度、自然放射能) を実施した。データベースに収録したデータの一覧を表-2に示す。

5. 岩石モデルに関する予備的解析

収集したデータを用いた予備的な解析として、国内での代表的な堆積岩として新第三紀砂質泥岩と結晶質岩として花崗岩を取り上げ、それぞれについてこれまでに提案されている岩石モデルの適用を試み、適合性を評価し、今後の研究課題の抽出を試みた。

(1) 新第三紀砂質泥岩への適用結果

収集したデータの中から、新第三紀の4種類の砂質

表-1 収集した室内岩石試験データ

データ 識別 コード	岩種 (岩相)	深度	Vp		Vs		密度			間隙率	飽和度	含水比	強度		変形係数		粒度組成				品質
			超音波	検層	超音波	検層	自然	乾燥	湿潤				一軸	せん断	E0	E50	礫	砂	シルト	粘土	
Hps	泥岩 花崗岩 他各種	一部欠如	○		○		○	○	○	○											B
Kn	泥岩	○		○		○			○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	A
Ks	砂岩	○		○		○			○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	A
Fs	砂質泥岩	○		○		○		○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	A
It1	砂質シルト岩	○						○	○	○	○	○					○	○	○	○	A
It2	砂質シルト岩 (砂質泥岩)	○															○	○	○	○	A
Jnc	第三紀堆積岩 花崗岩 流紋岩 凝灰岩 他	一部欠如	○		○		○	○	○	○		○	○	○		○					B
HScm	斑状花崗岩 (広島型花崗)	○	○	○	○	○			○	○	○	○									B
HSrv	花崗岩 (アダムロ岩)	○		○		○			○	○	○										B
OkGr	花崗岩 (粗粒、中粒)	○	○	○	○				○	○			○			○					A
THK	砂岩 花崗岩 泥岩 安山岩 粘板岩 他		○		○		○	○	○	○			○								B
JRR	安山岩 玄武岩 花崗岩 泥岩 シルト岩 他		○		○		○	△	△	△			○								B
NKG	砂岩 石灰岩 花崗岩 泥岩 安山岩 他		△				△			△			三軸の 拘束圧と最大 主応力差			○					B
SEGJ	砂岩 凝灰岩 花崗岩 安山岩 他	○	○		○		△	△	△	△			△								B

○: データあり
△: 一部データあり

データの品質	A	高い
	B	一部低いものを含

表-2 収集した検層データ

データ 識別 コード	岩種 (岩相)	深度	測定値							計算値						品質	
			Vp	Vs	比抵抗			密度	自然放射能	孔径	Ip	Is	ポアソン比	間隙率 (密度)	間隙率 (比抵抗)		粘土含有量 (自然放射能)
					25cm	50cm	100cm										
It	砂質シルト岩	○	○	○	○(電導度)			○	○	○	○	○	○	○		○	A
Kn	泥岩	○	○	○									○				A
Ks	砂岩	○	○	○									○				A
Fs	砂質泥岩	○	○	○									○				A
OkyGrc	花崗岩(粗粒) 花崗岩(中粒)	○	○		○		○	○		○	○			○			A
Hslog	花崗岩 (アダムロ岩)	○	○	○	○			○			○	○	○	○			B
NgtDCg	砂礫	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○		○	B
NgtDss	砂	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○		○	B
KzsAlt	砂泥互層	○	○	○			○	○		○	○	○	○	○		○	A
KzsMs	泥岩	○	○	○				○	○	○	○	○	○	○		○	A
TskGr	花崗岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	A
YmnTs	凝灰質砂岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	B
C	(破砕帯)																
OtrAn	安山岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	A
OtrTb	凝灰角礫岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	A
SzkNSs	砂岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	A
SzkNSh	シルト岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	A

○: データあり

データの品質	A	高い
	B	一部低いものを含

泥岩（砂岩を含む）サイトに掘削された深さ300mクラスのボーリング孔で実施されたサスペンションPS検層で得られたP波、S波速度と同じボーリング孔で採取された岩石試料の室内試験で測定された有効間隙率のデータを用いた。岩石モデルの当てはめに当たっては、図-1を参考に、粒状媒質モデルの中のFriable Sand Model¹⁾と呼ばれるモデルの適合性を評価した。

図-4がP波弾性率と間隙率の関係で見た場合の適合結果である。図中の実線が岩石モデルから計算された理論値である。計算に使用した各種定数は図中に記載し

た。Cは、粘土含有量であり、0,50,100%の3ケースについて計算した。

一方、S波弾性率、つまり剛性率と間隙率の関係について同じモデルを用いて計算した結果が図-5である。計算に使用した拘束圧はP波の場合と同じ2MPaであるが、粒子間の接合の程度を表す配位数は、間隙率の分布により適合するように5から9に増加させている（配位数5は、間隙率50-60%、9は、30-40%に対応）。

これらの結果を見ると、P波、S波特性とも、既往のモデルで説明できる可能性が高いことがわかるが、S波

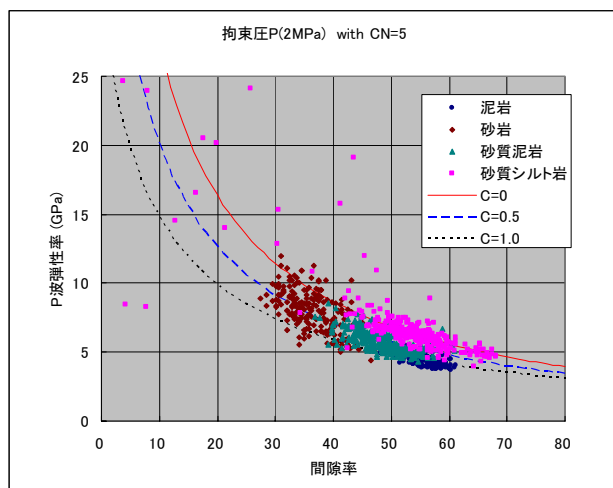


図-4 砂質泥岩のP波弾性率と間隙率
($K=36.6\text{GPa}$, $G=45\text{GPa}$, 臨界間隙率=80%, 配位数=5)

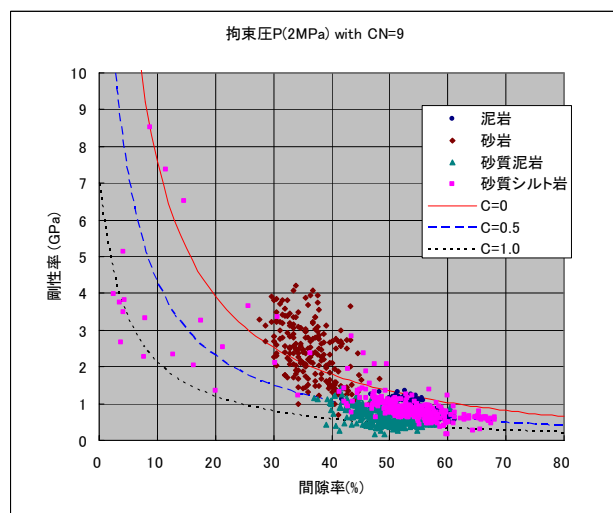


図-5 砂質泥岩の剛性率と間隙率

特性についてはモデルパラメータの細かな調整が必要なのがわかる。つまり、S波の場合、P波に比べてモデルパラメータへの感度が高く、パラメータのより正確な設定が必要なのがわかる。逆に言えば、S波データを利用することによって、より精度の高い岩石モデルの構築が可能になることを示唆しており、石油・ガス開発分野に比べ、S波データの入手が容易な地盤工学分野での岩石モデル化の研究の利点を示唆している。

(2) 花崗岩への適用結果

砂質泥岩同様に、花崗岩データについて既往のモデルの適合性を評価した。使用したデータは、花崗岩中に掘削された深度約600mのボーリング孔で実施された音波検層によるP波速度と密度検層から推定された間隙率である。評価に使用した岩石モデルは、亀裂性媒質のモデル化に広く利用されている有効媒質モデルの1つであるKuster-Toksozモデル¹⁴⁾を用いた。このモデルは、

均質な媒質中に亀裂がランダムに分布しているような岩石を想定している。

図-6に、P波速度と間隙率の関係について、このモデルで計算された理論値との比較を示す。このモデルでは、亀裂の形状を表すアスペクト比の値によって計算値が大きく異なるので、図にはアスペクト比が0.05, 0.1, 0.2, 0.4の4ケースについて計算値を示している。

この結果を見ると、花崗岩についても、少なくともこのデータについては、既往の岩石モデルの適用性は高いと考えられる。しかしながら、実際の岩石の亀裂の数や分布性状、アスペクト比等の形状は様々であると思われるので、有効媒質モデルの適用限界も含め今後更に検討が必要である。

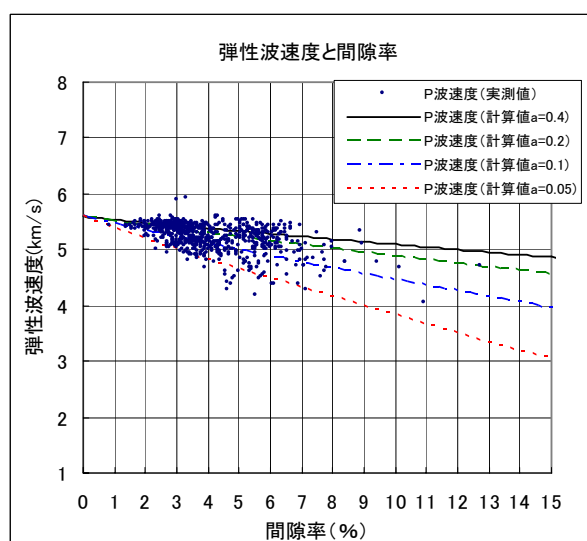


図-6 花崗岩のP波速度と間隙率

6. 今後の計画

物性データについては各種の岩種について質の高いデータが収集できたと考えているが、物性と工学量の両方が揃ったデータが少ないため、今後も引き続きデータの収集を続けていきたい。また、収集したデータを用いて既往モデルの適用を試み、適用の可否、限界等について検討を行い、その結果をもとに、地盤工学分野が対象とする各種岩石の岩石モデル構築のための考え方をまとめていきたいと考えている。

謝辞：本稿は、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」の成果をベースに作成した。

参考文献

- 1) Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G.: Quantitative seismic interpretation, *Cambridge University Press*, 2005.
- 2) 鈴木浩一, 木方建造, 宮川公雄, 岡田哲実: 物理探査データによる地盤物性値の評価法の開発(その2) -堆積性軟岩・硬岩を考慮した透水係数の解析法の適用-, 電力中央研究所報告, U99080, 2000.
- 3) 羽竜忠男, 西川貢, 伝法谷彰人: 間隙率-飽和度トモグラフィ (ϕ -Sw tomography) の応用地質学的研究, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 2001, 115-118, 日本応用地質学会, 2001.
- 4) 須藤宏, 田中利和, 近藤達敏: 山岳トンネル地質調査における弾性波速度による変形特性評価, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 345-346, 2005.
- 5) Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J.: The rock physics handbook, *Cambridge University Press*, 1998.
- 6) Archie, G.E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. Am. Inst. Mech. Eng.*, 146, 54-62, 1942.
- 7) Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W.: Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, 21, 41-70, 1956.
- 8) Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, G.H.F.: An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media, *Geophysics*, 23, 459-493, 1958.
- 9) 高倉伸一: アーチの式と並列回路, CA研究会, 127, 2003.
- 10) Raymer, L.L., Hunt, E.R., Gardner, J.S.: An improved sonic transit time-to-porosity transform, *Trans. Soc. Prof. Well Log Analysts, 21st Annual Logging Symposium, Paper P*, 1980.
- 11) Dvorkin, J.: Technical notes on rock physics, 2001.
- 12) 松岡俊文: ロックフィジックスー定量的な地下のモデル化に向けてー, 特別シンポジウム「ロックフィジックス研究の現状と将来展望」発表講演資料集, 1-11, 2006.
- 13) 小西千里, 東宏幸, Dvorkin, J., 荻沼真之: 堆積性軟岩の Rock Physics model, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 141-144, 2007.
- 14) Kuster, G.T. and Toksoz, M.N. (1974): Velocity and attenuation of seismic waves in two phase media, *Geophysics*, 39, 587-618, 1974.

STUDY ON ROCK PHYSICAL INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATA - DATA COLLECTION OF PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS AND PRELIMINARY STUDY OF ROCK PHYSICS MODELS -

Toru TAKAHASHI and Soichi TANAKA

Rock physical interpretation of seismic data has been aggressively used in oil and gas industry for characterizing and monitoring oil and gas reservoirs. In geotechnical applications, not only sedimentary rocks but also crystalline rocks such as granite must be characterized and modeled for further analysis. However there is no open database available for rock physics study. We have therefore started collecting the geophysical data and studying rock physics models of wide variety of rocks for geotechnical applications. In this paper we present the collected data and show the preliminary study results of applicability of existing rock physics models to soft rocks and granites which are common in Japan.