

# 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 —

高橋 亨<sup>1</sup>・田中 莊一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>深田地質研究所

Study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications  
- Data collection of physical properties of rocks and preliminary study of rock physical models -

TAKAHASHI Toru<sup>1</sup> and TANAKA Soichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fukada Geological Institute

要旨：近年、石油・ガス探査分野では、貯留層の特性の把握やモニタリングにおいて、ロックフィジックスをベースにした地震探査データの解釈技術に関する研究や適用が積極的に行われている。この分野では、主に地震探査データを用いて、砂岩のような堆積岩がモデル化の対象となっている。一方、土木や環境分野を含む地盤工学分野でも、地盤の力学的、水理学的モデル化を行うためには、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が重要となってきているが、この分野では、堆積岩だけでなく、花崗岩などの結晶質岩もモデル化の対象とする必要がある。そこで、筆者達は、地盤工学分野で遭遇する各種岩石に対する物理探査データの解釈技術に関するロックフィジックスをベースにした研究を開始した。研究では、室内岩石試験や検層で得られた岩石物性データを収集するとともに、それらのデータを用いて既存の岩石モデルの適用性に関する予備的な検討を行った。本稿では、地盤工学分野での物理探査データの解釈技術の現状について外観するとともに、石油・ガス探査分野で開発されてきたロックフィジックスの概要について説明する。その後、本研究で収集した岩石物性データの内容と実例を紹介する。収集したデータのうち、国内の代表的な岩種である堆積年代の若い堆積軟岩の例として泥岩と亀裂の多い結晶質岩の例として花崗岩の物性データについて既存の岩石モデルの適用を試み、今後の地盤工学分野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とした解釈技術の研究課題を抽出した。

キーワード：物理探査、ロックフィジックス、地盤工学分野での適用、データベース

ABSTRACT: In recent years, rock physical interpretation of seismic data has been aggressively used in oil and gas industry for characterizing and monitoring oil and gas reservoirs. In this field, only sedimentary rocks such as sandstone have been modeled using mainly seismic data. In civil engineering and environmental applications, rock physical interpretation of geophysical data has become more important to obtain mechanical and hydrogeological subsurface models. In geotechnical applications, not only sedimentary rocks but also crystalline rocks such as granite must be characterized and modeled for further analysis. We have therefore started studying rock physics models of wide variety of rocks using many geophysical data for geotechnical applications. We firstly collected the data of physical properties of rocks obtained in laboratory tests and well loggings and then used these data for preliminary study of applicability of the existing rock physics models. In this paper we briefly review the present interpretation technologies of geophysical data for geotechnical applications and rock physics which has been mainly developed in the oil and gas exploration field. Then the lists of physical property data collected are presented with some real data examples. The applicability test results of the existing rock physics models to young soft mudstones and crystalline granite which are very common rocks in geotechnical applications in Japan are described in detail to clarify the problems to be addressed in the future study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications.

Keywords: geophysics, rock physics, geotechnical applications, database

## はじめに

二酸化炭素の地層隔離・核廃棄物の地層処分などの環境対策、土木・建設分野での地下の利用・開発、資源・エネルギーの開発など、地下を利用・開発する産業分野においては、地下の状態を正確に把握することは、事業の成否を決める上で極めて重要な要件である。特に、最近では、油ガス田の開発においても貯留層からの二次・三次回収による回収率の極限までの向上が求められている。また、土木建設分野においても性能設計の導入や事業費の縮減などにより、経済的に合理的な設計・施工の要求が増大している。そのため、事業の基礎データたる地下の情報は、これまでのような地層の分布や形状だけの情報にとどまらず、各地層の物性や組成、それも事業目的に直接役立つ情報の提供が求められるようになってきている。

地下の状態を間接的・非破壊的に把握する技術として物理探査がある(物理探査学会, 1998)。物理探査は、弾性波や電気などの様々な物理現象を利用して地下の状態を推定する技術であるが、上記のようなニーズに答えるべく、新しい技術の開発や既存技術の高度化が積極的に行われている。しかしながら、物理探査で直接得られる物理量は、弾性波速度や電気抵抗などであり、石油や地下水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、事業者が直接必要としているものではない。そこで、探査で得られる物理量から事業者が必要とする地盤の特性を推定するための探査結果の解釈技術が重要となってきた。

物理探査結果の解釈技術の開発の分野で近年注目されているのは、ロックフィジックスの研究である(Mavko et al., 1998)。ロックフィジックスは、熱力学に対する気体分子運動論のように、マ

クロな特性である岩盤の弾性波速度や比抵抗、あるいは間隙率や透水性といった特性を、岩石粒子レベルにまで分解したマイクロなモデルに基づいて理解し、相互の関係を合理的に説明しようとする学問体系である。これまでは主に石油やガスの探査・開発分野において研究、適用が進められてきている。石油やガスの増進回収などのために実施される繰り返し地震探査(4D地震探査)で得られる反射法地震探査データの解釈の中で積極的に利用され、貯留層の管理に必要な各種パラメータを提供するまでに発展してきている(Avseth et al., 2005)。

しかしながら、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、利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の研究が進んでいる岩石も砂質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波速度に関係する物性に限られているのが現状である。一方、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の多い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、多くの物性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を土木建設分野や地盤工学分野で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各種物性とともにも工学的に重要な力学的、水理学的特性が揃った各種岩石の物性データが必要であるが、国内外を見渡しても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。

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。

#### 地盤工学分野での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、上述のとおり、物理探査で直接得られる物理量は、弾性波速度や電気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特性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（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、積極的に進められるようになってきた（例えば、鈴木ほか、2000、羽竜ほか、2001）。

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。それぞれの手法の特徴と事例を以下に示す。

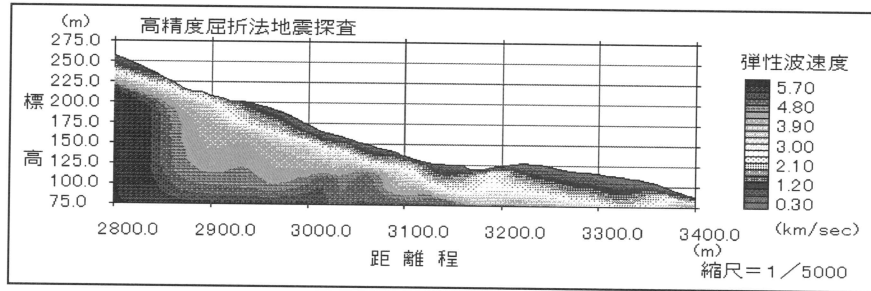
#### （1）物理探査データと工学量の相関関係を利用する方法

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、広く一般に利用されている。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。

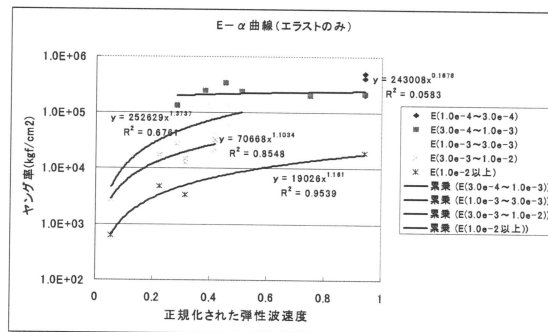
図1に、この手法を適用した事例を示す。この例は、屈折法弾性波探査で得られた弾性波速度（P波速度）と孔内載荷試験によって得られたヤング率の相関解析により両物性間の関係式を求め、トンネルの施工計画に必要な歪の大きい領域でのヤング率の分布をトンネルルート全体にわたって推定した結果である（須藤ほか、2005）。この例は、広域的に物性分布を推定できるという物理探査の長所を生かして、工学的に必要な特性の広域分布を推定できることを示したよい例である。

#### （2）経験式を利用する方法

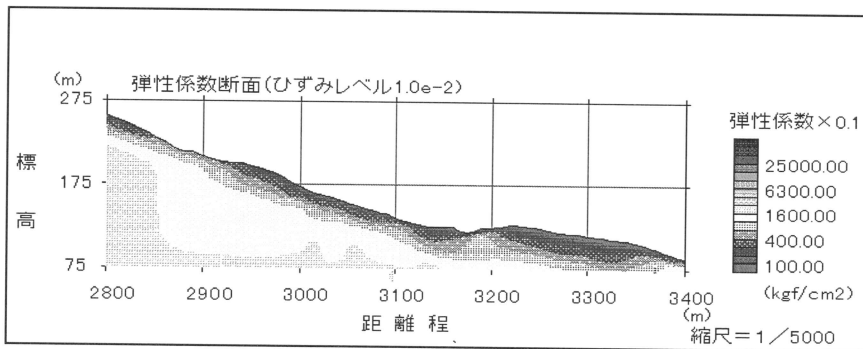
物理探査で得られる物性と工学的に重要な力学あるいは水理学的特性との関係についての経験式は数多く提案されている(Mavko et al., 1998)。比抵抗と間隙率の経験式であるアーチの式、弾性波速度と間隙率の経験式である時間平均公式はそれらの中でも特に有名で広く利用されている(Archie, 1942, Wyllie et al., 1956, 1958)。経験式も、実際のデータの関係解析から求められているが、導出までに多くのデータが利用解析されてい



P 波速度分布



P 波速度とヤング率の相関図



推定ヤング率分布

図1 屈折法弾性波探査による P 波速度からヤング率分布を推定した結果 (須藤ほか, 2005)

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、利用されている。表面伝導を考慮した拡張アーチの式 (高倉, 2003) や時間平均公式を拡張した Raymer-Hunt-Gardner の式 (Raymer et al., 1980) などの拡張式はよく知られている。

図2には、この手法の実例として、アーチの式を適用した例を示す。この例では、比抵抗トモグ

ラフィで得られた比抵抗分布と地下水検層から推定された間隙水の比抵抗値をアーチの式に当てはめ、間隙率の広域的な分布を推定している (鈴木ほか, 2000)。複数の経験式をもとに、複数の物性値から最小二乗法により複数の工学量を推定する試みも行われている。例えば、羽竜ほか (2001) は、物理探査で得られる P 波速度と比抵抗の間隙率と飽和度に関する経験式を用いて、同一サイトで実施した屈折法地震探査と電気探査で得られた両物性分布から間隙率と飽和度の分布を求めている。



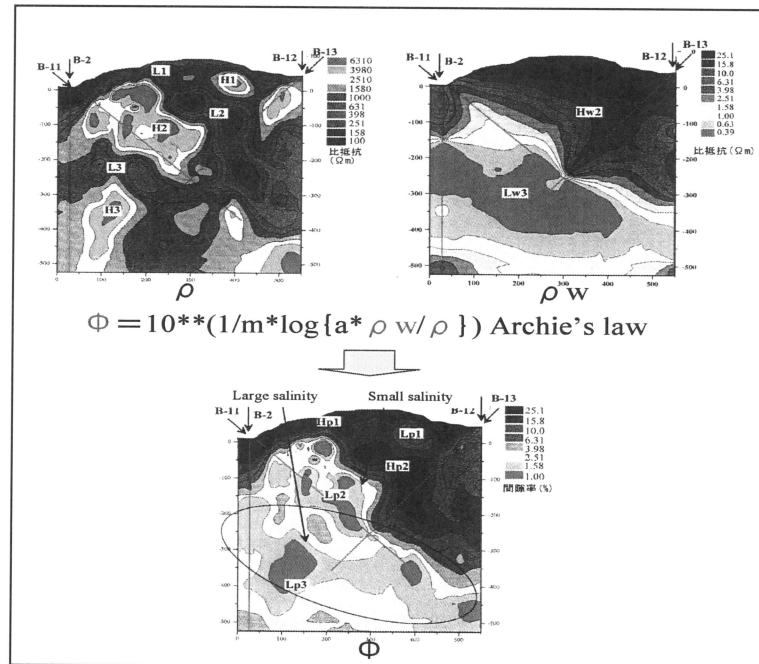


図2 比抵抗トモグラフィ、検層による比抵抗値から間隙率分布を推定した結果 (鈴木ほか, 2000)

### (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(Mavko et al., 1998)。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。次の章でこの手法の詳細について説明する。

### 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3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3の右図は、P波弾性波特性である圧縮弾性率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 (Dvorkin,2001)。

ロックフィジックスの研究や適用は、これまで主に、石油やガスの探査・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もとにしたモデル化が行われてきた。特に、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が、図4は、P波速度と間隙率の関係を使って、これまで提案されている主要なモデルをまとめたものである (松岡,

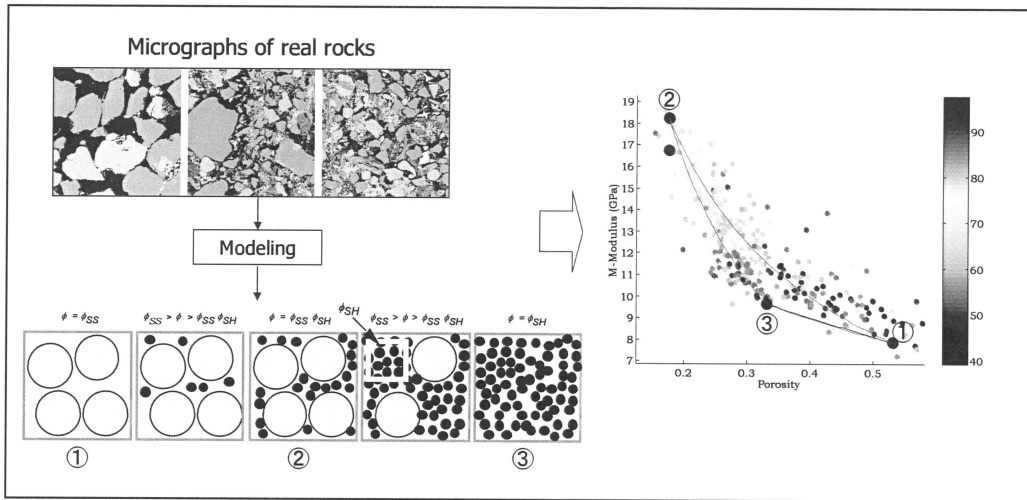


図3 ロックフィジックスの概念 (Dvorkin,2001)

2006). 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ことがわかる。

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関係を求めた結果が図5である (小西ほか, 2007). 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。

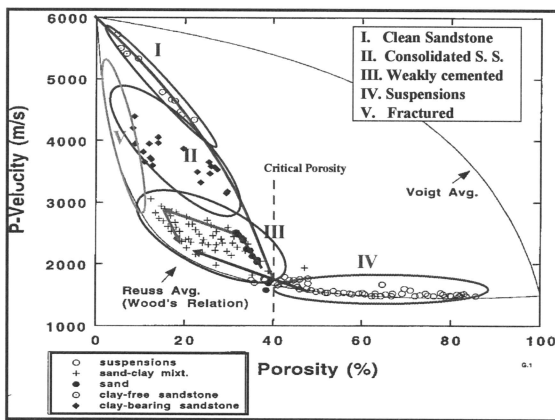


図4 岩石モデル (松岡, 2006)

3本の実線は、粘土含有率をそれぞれ、0,50,100%とした結果である。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地区のデータは1つのモデルによって説明されていることがわかる。

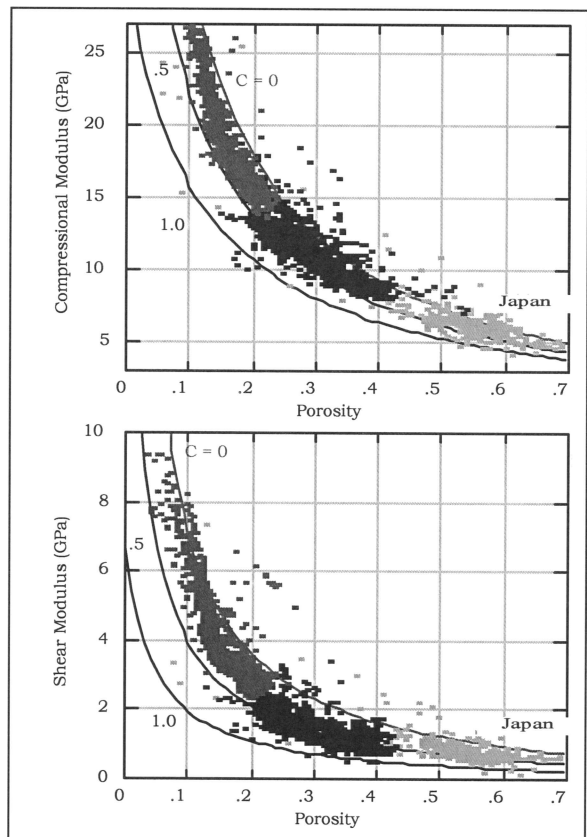


図5 岩石モデルの適用例 (小西ほか, 2007)

## 岩石の物性データの収集と整理

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。以下に、それぞれのデータの詳細について記載する。

### (1) 室内岩石試験データ

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。表には、各データについて下記の物性情報を記載した。また、データベースのデータの一部を例として表2に示す。

- ・岩種（岩相）：砂岩、泥岩、花崗岩など
- ・深度（または深度相当の拘束圧）：
- ・P波速度：超音波速度（無い場合検層）
- ・S波速度：同上
- ・密度：自然、乾燥、湿潤状態を区別
- ・間隙率（有効間隙率）
- ・飽和度：水の飽和度
- ・含水比：
- ・強度：一軸圧縮強度、せん断強度
- ・変形係数：接線係数(E0)と割線係数(E50)
- ・粒度組成：礫、砂、シルト、粘土の組成
- ・品質：データの出席、取得条件、質の3つが全

て揃っている場合にはA、そのうちの1つでも欠けている場合にはBとしている。

収集したデータの一例として、国内を代表する岩種の例として、堆積岩について、新第三紀の堆積岩、結晶質岩について、花崗岩のデータ例を示す。岩石モデルを検討する上で最も重要な関係である間隙率と弾性波速度の相関図としてそれぞれ、図6と図7に示す。

### (2) 検層データ

検層データについては、室内岩石試験同様、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。表3に、入手した検層データの取得条件を示す。

データベースに収録したデータの一覧を表4に示す。表には、各データについて下記の情報を記載した。また、データベースのデータの一部を例として、表5に示す。

- ・岩種（岩相）：砂岩、泥岩、花崗岩など
- ・深度：
- ・測定値 P波速度：  
S波速度：  
比抵抗：ノルマル（25,50,100cm）  
密度：  
自然放射能  
孔径
- ・計算値 P波音響インピーダンス  
S波音響インピーダンス (Is)  
動ポアソン比  
間隙率（密度から計算）  
間隙率（比抵抗から計算）  
粘土含有量（自然放射能から計算）

収集した検層データの一例として、中生代砂岩と花崗岩の例を、それぞれ、図8と図9に示す。

表1 収集した室内岩石試験データの一覧

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
HScmt	斑状花崗岩 (広島型花崗)	○	○	○	○	○		○	○	○	○										B
HSrv	花崗岩 (アタモロ岩)	○		○		○		○	○	○											B
OkvGr	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		△				△			△						○					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 収集した室内岩石試験データの実例

データ 識別 コード	岩種 (岩相)	深度 m	Vp		Vs		密度			間隙率 %	飽和度 %	含水比 %	強度		変形係数		粒度組成				備考(文献など)
			超音波 km/s	検層 km/s	超音波 km/s	検層 km/s	自然 kg/m <sup>3</sup>	乾燥	湿潤				一軸 MPa	せん断 MPa	E0	E50	礫	砂	シルト	粘土	
HScmt	斑状花崗岩	1.17	0.76	1.5	0.38	0.65			2398	8.2	27.3	5.0									CL-1
	斑状花崗岩	0	0.87		0.53				2469	8.7	22.8	1.3									CL-2
	斑状花崗岩	2.71	0.88	2.5	0.47	1.05			2448	6.5	27.8	7.8									CL-2
	斑状花崗岩	0	0.84		0.51				2458	9.7	63.6	2.6									CL-3
	斑状花崗岩	3.81	1.03	2.5	0.65	0.8			2492	6.2	24.2	2.9									CL-3
	斑状花崗岩	2.41	0.89	2.5	0.47	1.05			2487	6.5	27.8	0.7									CL-3
	斑状花崗岩	3.35	0.76	2.5	0.39	0.8			2495	6.2	24.2	3.9									CL-4
	斑状花崗岩	2.13	0.84	2.5	0.45	1.05			2495	6.5	27.8	0.7									CL-4
	斑状花崗岩	2.57	0.9	2.5	0.47	1.05			2477	6.5	27.8	3.3									CL-5
	斑状花崗岩	1.31	1	1.5	0.44	0.65			2447	5.5	63.3	1.4									CL-5
	斑状花崗岩	0.37	0.6	1.2	0.33	0.65			2327	8.2	23.7	0.8									CL-6
	斑状花崗岩	2.27	0.84	2.5	0.45	1.05			2495	6.5	27.8	0.7									CL-7
	斑状花崗岩	0.13	0.51	0.35	0.28	0.22			2097	36.4	30.8	7.1									CL-B
	斑状花崗岩	0.19	0.46	0.52	0.3	0.26			2089	28.7	72.0	11.0									DH-1
	斑状花崗岩	1.39	0.55	0.65	0.31	0.4			2175	24.5	73.2	9.0									DH-2
	斑状花崗岩	2.77	0.51	1.1	0.3	0.63			2231	22.6	57.3	6.6									DH-3
	斑状花崗岩	1.14	0.51	0.58	0.29	0.41			2096	27.3	64.0	9.1									DH-3
	斑状花崗岩	0.87	0.48	0.52	0.26	0.26			2143												DH-4
	斑状花崗岩	1.28	0.49	0.58	0.29	0.41			2141	25.3	65.7	8.4									DH-4
	斑状花崗岩	2.63	0.58	1.1	0.3	0.63			2240	14.9	96.6	6.7									DH-4
	斑状花崗岩	0.52	0.46	0.35	0.27	0.22			2092	28.4	70.6	10.6									DH-5
	斑状花崗岩	1.64	0.56	0.65	0.31	0.4			2176	24.9	62.0	8.0									DH-5
	斑状花崗岩	0.27	0.46	0.35	0.28	0.22			2103	29.8	59.8	9.9									DH-7
	斑状花崗岩	1.62	0.52	0.45	0.28	0.3			2166	21.6	83.6	8.6									DH-8
	斑状花崗岩	1.81	0.33	0.42	0.2	0.25			2144	24.3	64.5	7.9									DM-1
	斑状花崗岩	3.13	0.34	0.75	0.21	0.45			2046	29.9	47.5	8.0									DM-2
	斑状花崗岩	1.67	0.35	0.42	0.18	0.25			2129	25.1	64.9	8.3									DM-2
	斑状花崗岩	3.27	0.34	0.75	0.21	0.45			2131	26.3	58.3	8.2									DM-3
	斑状花崗岩	1.68	0.3	0.64	0.17	0.4			2172	22.8	63.7	7.2									DM-3
	斑状花崗岩	1.82	0.28	0.64	0.15	0.4			2198	22.7	74.2	8.3									DM-4
	斑状花崗岩	4.32	0.33	1.05	0.18	0.55			2118	24.6	54.2	7.0									DM-4
	斑状花崗岩	1.32	0.3	0.38	0.14	0.25			2158	23.7	64.4	7.6									DM-5
	斑状花崗岩	3.73	0.38	0.75	0.21	0.45			2135	26.3	58.3	8.2									DM-5
	斑状花崗岩	4.63	0.33	1.05	0.18	0.55			2156	22.1	56.5	8.3									DM-6
	斑状花崗岩	2.43	0.33	0.75	0.2	0.45			2144	24.5	64.7	8.6									DM-7
	斑状花崗岩	2.22	0.35	0.75	0.18	0.45			2129	25.1	64.9	8.3									DM-8

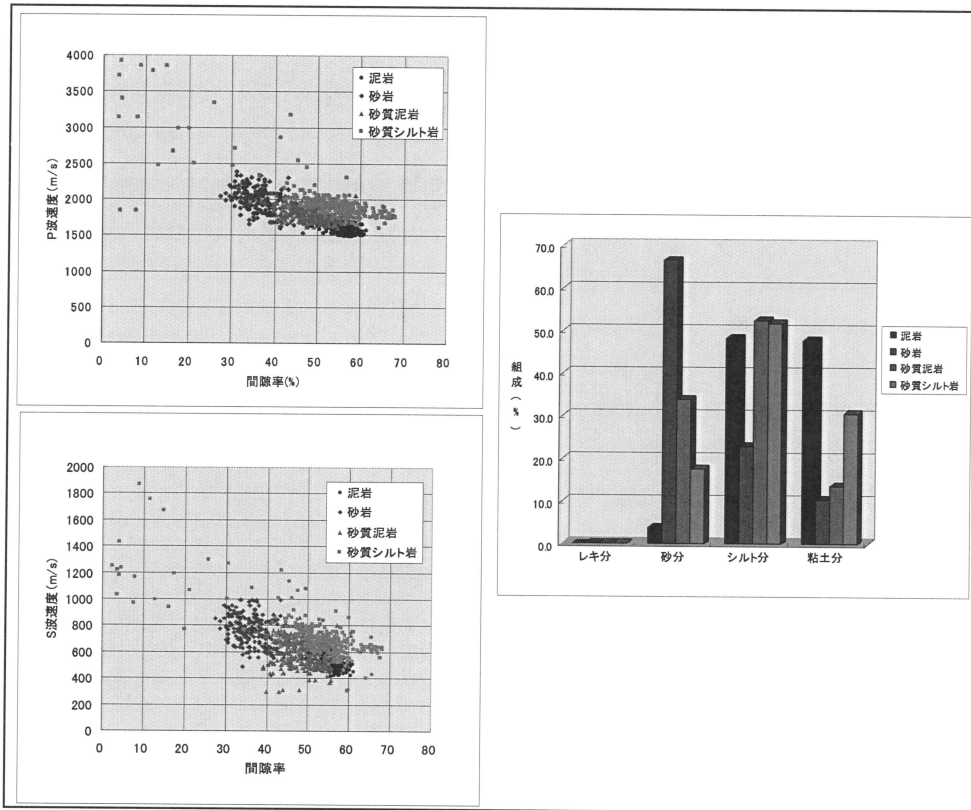


図6 室内岩石試験データの一部 (新第三紀堆積岩)

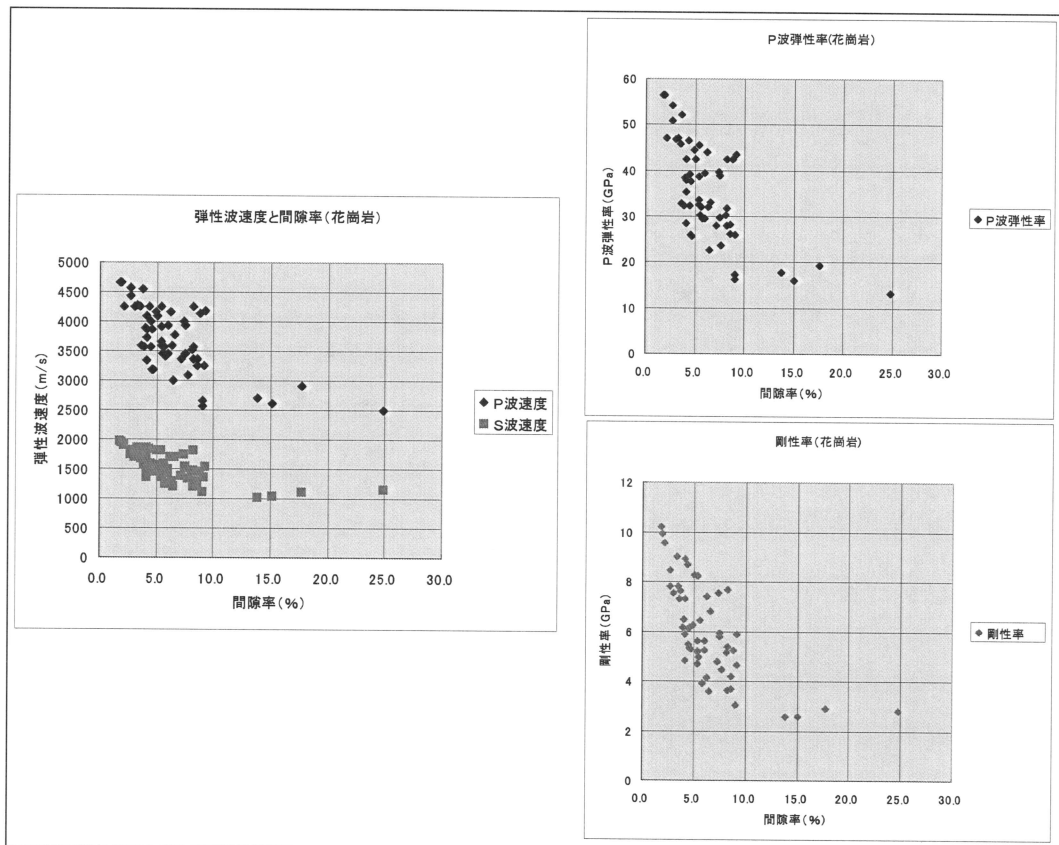


図7 室内岩石試験データの一部 (花崗岩)

表3 収集した検層データの取得条件一覧

岩種	測定深度範囲	検層項目	物性
花崗岩 1	4-48m	サスペンション PS 電気 (ノルマル) 密度 自然放射能	P 波, S 波速度 比抵抗 密度 (自然ガンマ線強度)
花崗岩 2	10-750m	音波検層 電気 (ノルマル) 密度	P 波速度 比抵抗 密度
火山砕屑岩	159-260m	サスペンション PS 電気 (ノルマル) 密度 自然放射能	P 波, S 波速度 比抵抗 密度 (自然ガンマ線強度)
礫岩	47-79m	同上	同上
砂岩	42-84m	同上	同上
新第三紀泥岩 1	29-600m	音波検層 電気 密度 自然放射能	P 波速度 比抵抗 密度 (自然ガンマ線強度)
新第三紀泥岩 2	10-300m	サスペンション PS	P 波, S 波速度
新第三紀泥岩 3	10-300m	サスペンション PS 電気伝導度	P 波, S 波速度 比抵抗
洪積層	7-127m	サスペンション PS 電気	P 波, S 波速度 比抵抗

表4 収集した検層データの一覧

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)	○	○		○		○			○	○		○				A
	花崗岩(中粒)																
Hslog	花崗岩 (アダメロ岩)	○	○	○		○				○	○		○				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 (破砕帯)	○	○	○	○	○	○		○	○		○				○	B
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

表5 収集した検層データの実例

データ 識別 コード	岩種 (岩相)	深度	測定値						計算値						備考(文献など)		
			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										
TkbGr	花崗岩	5.5	4850	2560	1136	1200	814	2.61	6.65	98.5	12639.8	6671.7	0.307	5.52			鉱物密度2.7
TkbGr	花崗岩	6.5	5050	2820	1227	1288	828	2.60	6.4	98.6	13144.6	7340.1	0.273	5.71			
TkbGr	花崗岩	7.5	5210	3030	1943	2036	1036	2.60	6.26	98.8	13530.2	7868.8	0.244	6.06			
TkbGr	花崗岩	8.5	4850	2350	820	814	684	2.60	7.54	98.8	12592.4	6101.5	0.347	6.10			
TkbGr	花崗岩	9.5	5260	2700	1440	1315	582	2.59	5.77	98.6	13638	7000.5	0.321	6.31			
TkbGr	花崗岩	10.5	4900	1980	909	862	647	2.59	5.7	98.7	12672.7	5120.8	0.402	6.69			
TkbGr	花崗岩	11.5	4200	1980	660	656	558	2.58	5.76	99.5	10852.1	5116	0.357	6.83			
TkbGr	花崗岩	12.5	4850	2470	516	532	517	2.59	6.37	98.4	12544.6	6388.7	0.325	6.68			
TkbGr	花崗岩	13.5	4420	2530	680	677	558	2.59	6.5	98.6	11429.9	6542.4	0.256	6.71			
TkbGr	花崗岩	14.5	4390	2040	648	651	560	2.59	6.52	99.5	11357.7	5277.8	0.362	6.64			
TkbGr	花崗岩	15.5	4030	1720	423	498	535	2.58	4.91	104.1	10409.3	4442.7	0.389	6.88			
TkbGr	花崗岩	16.5	4130	1940	389	434	495	2.59	4.68	99.5	10682.2	5017.8	0.358	6.68			
TkbGr	花崗岩	17.5	4590	2110	552	530	500	2.59	5.46	99.5	11883.9	5463	0.366	6.52			
TkbGr	花崗岩	18.5	4670	2410	620	650	530	2.59	5.29	98.2	12084.2	6236.1	0.319	6.61			
TkbGr	花崗岩	19.5	4720	2630	1384	1550	889	2.60	6.92	97.9	12268.5	6836	0.275	5.93			
TkbGr	花崗岩	20.5	5100	2740	1420	1694	1238	2.59	6.95	97.9	13232.2	7109.1	0.297	6.20			
TkbGr	花崗岩	21.5	5380	2860	1440	1598	1072	2.59	5.65	98	13948.6	7415.1	0.303	6.31			
TkbGr	花崗岩	22.5	4900	2600	1430	1786	1144	2.59	6.57	97.8	12700.5	6739	0.304	6.36			
TkbGr	花崗岩	23.5	4950	2630	400	480	533	2.59	7.79	97.7	12824.4	6813.8	0.303	6.42			
TkbGr	花崗岩	24.5	4810	2700	917	954	610	2.59	7.4	99.5	12455.1	6991.4	0.270	6.50			
TkbGr	花崗岩	25.5	5280	2900	840	901	665	2.59	5.35	98	13625.7	7512.3	0.282	6.44			
TkbGr	花崗岩	26.5	5050	2780	960	1050	694	2.59	7.84	98.1	13091	7206.5	0.283	6.34			
TkbGr	花崗岩	27.5	5380	2860	1102	1240	870	2.59	8.05	97.9	13950.9	7416.3	0.303	6.29			

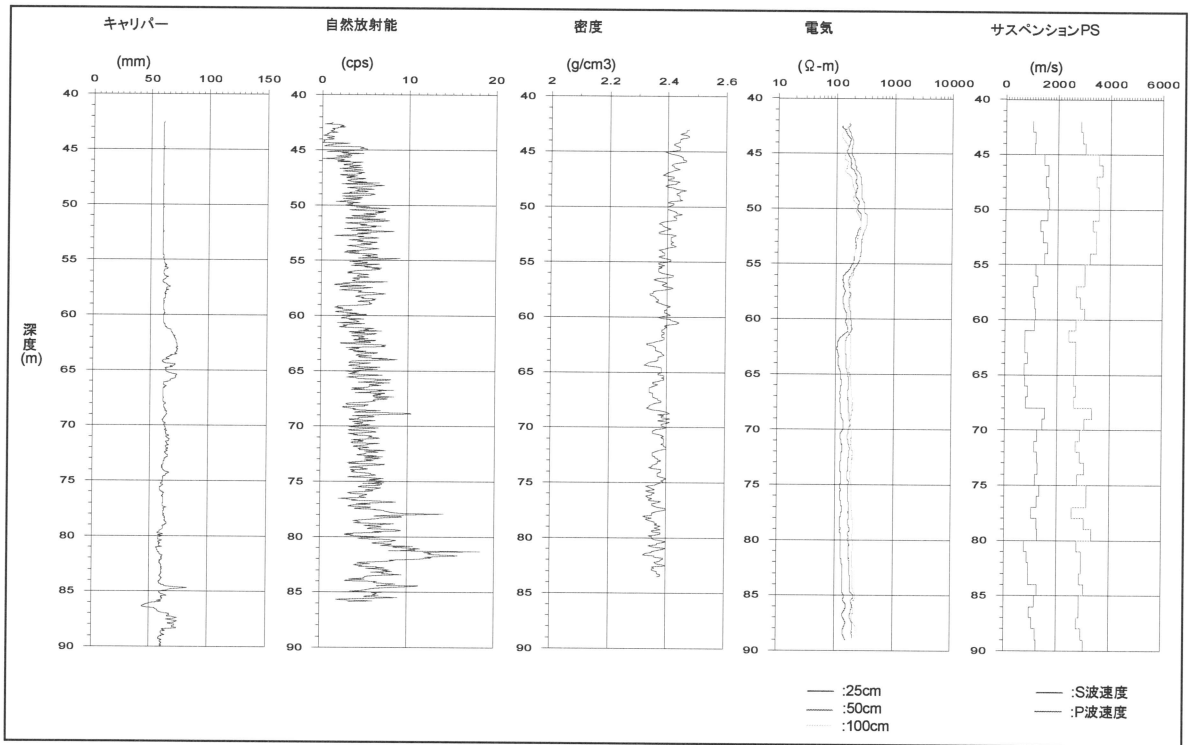


図8 検層データの一例（中生代砂岩）

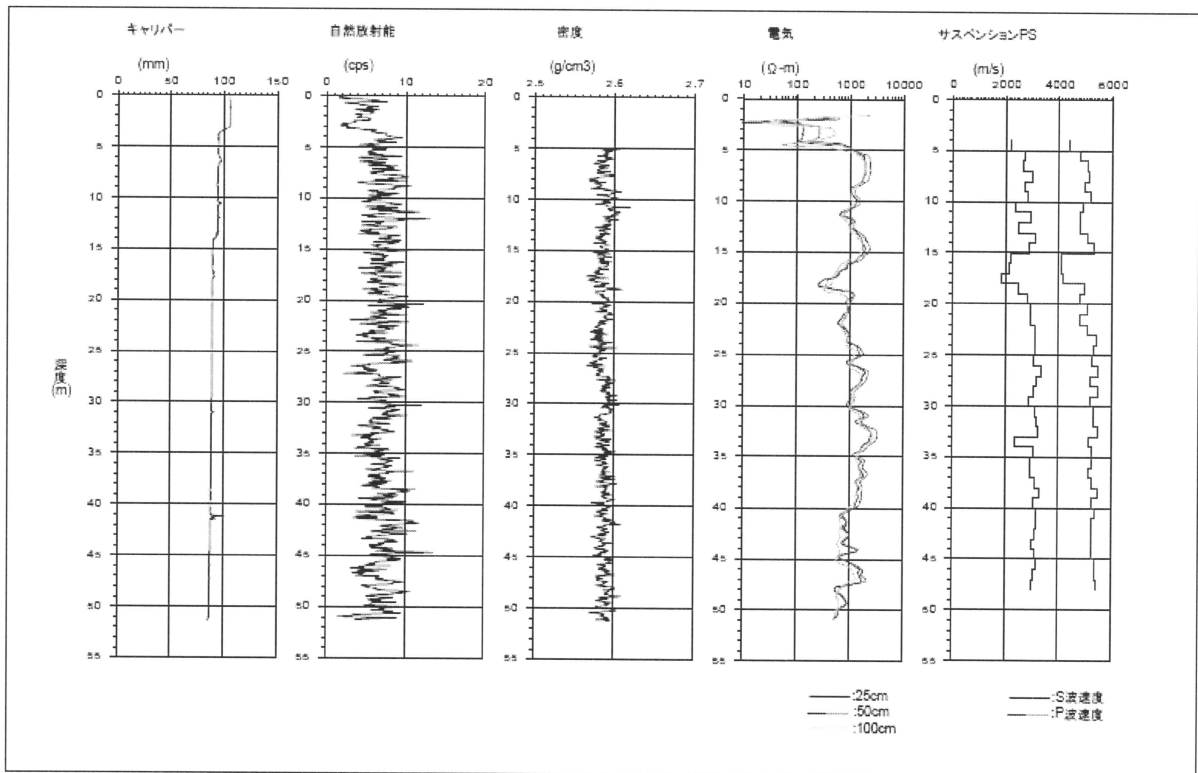


図9 検層データの一例（花崗岩）



## 岩石モデルに関する予備的解析

収集整理した室内岩石試験および検層データ全てについて、測定された物性およびそれらから計算された物性を相関図として表示したものを、図 10 と図 11 に示す。室内岩石試験データについては、P 波速度、S 波速度、密度、間隙率（有効間隙率）が測定値であり、ポアソン比は P 波、S 波速度から計算した動ポアソン比である。検層データについては、P 波速度、S 波速度、比抵抗、密度、自然放射能による計数値が測定値である。比抵抗値は、ノルマル電気検層で電極間隔が 100cm の見かけ比抵抗値である。間隙率は、密度検層結果から鉱物密度を仮定して計算した値である。ポアソン比は、P 波、S 波速度から計算した動ポアソン比である。なお、これらのデータには、物性値に影響を及ぼす風化状態、含水状態、拘束圧（深度）の異なるデータが一緒に表示されていることに注意が必要である。

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

岩石モデルを検討する場合、弾性波特性（弾性波速度や弾性率）と間隙率の関係を解析することから始めるのが一般的である。そこで、図 12 に岩石の弾性波速度と間隙率、弾性率と間隙率の関係を、粒度分布と一緒に示す。

粒度分布を見ると、砂質泥岩の中でも、砂岩、砂質泥岩、砂質シルト岩、泥岩で、粒度分布が異なることがわかる。砂質シルト岩のデータのばら

つきが若干大きい、それ以外のデータについてはばらつきも少なく品質の高いデータであることがわかる。

これらのデータにどのような岩石モデルを適用するかを検討する場合、これまでの研究でまとめられた弾性波速度（P 波速度）と間隙率の関係図（図 13）と比較するのがよい。

図 13 と比較すると、ここで対象とするデータは、モデル III (Weakly Cemented Model) に含まれる岩石モデルの適用が適当であると判断されるので、ここでは、膠結度が非常に弱い岩石モデルとして、粒状媒質モデルの中の Friable Sand Model (Avseth et al., 2005) と呼ばれるモデルの適合度を評価した。

モデルの当てはめを行う場合、まず、乾燥状態での弾性率（体積弾性率と剛性率）を計算し、次に、Gassmann の流体置換式を用いて飽和状態での弾性率を計算する。そこでここでは、Mavko et al. (1998) に基づき、下記のように飽和状態での弾性率を求める。

まず、乾燥状態での体積弾性率  $K_{dry}$  と剛性率  $G_{dry}$  を下式により計算する。その際、砂質泥岩を砂粒子と粘土粒子が混在するモデルと考えて、それぞれの弾性定数を計算する。

$$K_{dry} = \left[ \frac{\phi/\phi_0}{K_{HM} + 4/3 G_{HM}} + \frac{1-\phi/\phi_0}{K_s + 4/3 G_{HM}} \right]^{-1} - \frac{4}{3} G_{HM}$$

$$G_{dry} = \left[ \frac{\phi/\phi_0}{G_{HM} + \frac{G_{HM}}{6} \left( \frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}} \right)} + \frac{1-\phi/\phi_0}{G_s + \frac{G_{HM}}{6} \left( \frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}} \right)} \right]^{-1} - \frac{G_{HM}}{6} \left( \frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}} \right)$$

ここに、 $K_{HM}$  と  $G_{HM}$  は、Hertz-Mindlin モデルの弾性率であり、下式で表される。

$$K_{HM} = \left[ \frac{n^2(1-\phi_0)^2 G_s^2}{18\pi^2(1-\nu)^2} P \right]^{1/3}$$

$$G_{HM} = \frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \left[ \frac{3n^2(1-\phi_0)^2 G_s^2}{2\pi^2(1-\nu)^2} P \right]^{1/3}$$

また、砂粒子と粘土粒子の混合した砂質泥岩の弾性率は、下式で表される。

$$K_s = \{(fsK_{sand} + fcK_{clay}) + 1/(fs/K_{sand} + fc/K_{clay})\}/2$$

$$G_s = \{(fsG_{sand} + fcG_{clay}) + 1/(fs/K_{sand} + fc/K_{clay})\}/2$$

ここに、

- fs : 砂粒子の割合 (体積分率)
- fc : 粘土粒子の割合 (体積分率)
- Ksand : 砂の体積弾性率
- Gsand : 砂の剛性率
- Kclay : 粘土の体積弾性率
- Gclay : 粘土の剛性率
- $\Phi_0$  : 臨界間隙率 (ここでは、0.8 を使用)
- $\Phi$  : 全間隙率 (0 と  $\Phi_0$  間の変数)
- $K_s$  : 骨格の体積弾性率
- $G_s$  : 骨格の剛性率
- P : 有効応力
- n : 配位数 (砂粒子間の接触数を表す量)

次に、Gassmann の流体置換式を用いて、乾燥状態の体積弾性率  $K_{dry}$  から飽和状態の体積弾性率  $K_{sat}$  を以下の式で計算する。なお、剛性率は飽和による変化は無いので、 $G_{sat}$  は  $G_{dry}$  と等しいとする。

$$K_{sat} = K_s \frac{\phi K_{dry} - (1 + \phi) K_f K_{dry} / K_s + K_f}{(1 - \phi) K_f + \phi K_s - K_f K_{dry} / K_s},$$

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

ここに、

$K_f$  : 孔隙流体 (ここでは水) の体積弾性率

飽和状態の弾性率が得られると、以下の式により、各種弾性波特性を計算することができる。

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

$G(\Phi) = G_{sat}$  : 剛性率

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

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

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

$\rho_s$  : 鉱物の密度,

$\rho_f$  : 流体の密度

適合結果を図 14 に示す。P 波弾性率と間隙率の相関図中の実線がこのモデルから計算される理論値である。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、ここでは、C=0 は砂、C=1 は粘土を表す。この結果を見ると、計算に使用する定数の細かなチューニングは必要であるが、P 波弾性率から判断する限り、既往の Friable Sand Model でこの岩石はモデル化できそうである。図 15 は、堆積岩のモデル化の場合重要な拘束圧を図 14 の計算での 1MPa から 2MPa に大きくした場合の計算結果との比較であるが、より適合度がよくなっていることがわかる。

一方、S 波弾性率、つまり剛性率について、同じモデルを用いて計算した結果が図 16 である。左図が、拘束圧 1MPa、右図が、2MPa の場合の結果である。この結果を見ると、泥岩、砂質泥岩、砂質シルト岩については、このモデルによってほぼ説明できそうであるが、砂岩については適合度が悪い。間隙率の違いが大きい場合、モデルパラメータの中で配位数にも留意が必要である。そこで、砂岩の間隙率 0.3-0.4 に適した配位数 9 で計算した結果を図 17 に示す。砂岩データのばらつきが他の岩種に比べて大きいため評価が難しいが、ばらつきのほぼ中央に理論曲線が位置しており、適合度が増したと判断される。S 波の場合、P 波に比べ、モデルパラメータへの感度が高く、パラメータの正確な選定がより重要であることがわかる。逆に言えば、岩石をモデル化する場合、S 波特性を利用すればより精度よく推定できる可能性があるということがわかる。

図 10 収集した室内岩石試験  
 験全データの物性分布

Vp : P 波速度  
 Vs : S 波速度  
 ρ : 密度  
 Φ : 間隙率

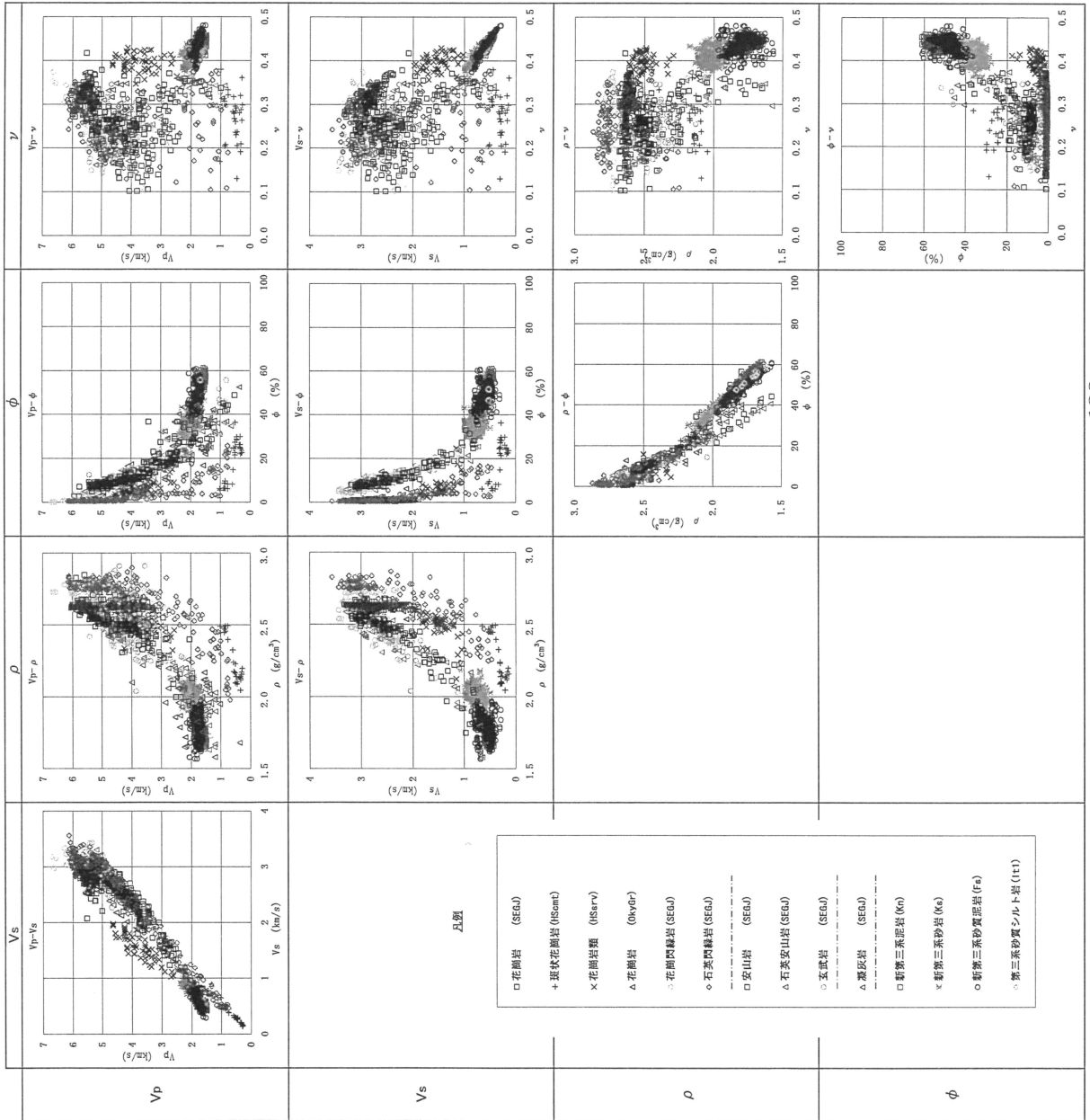
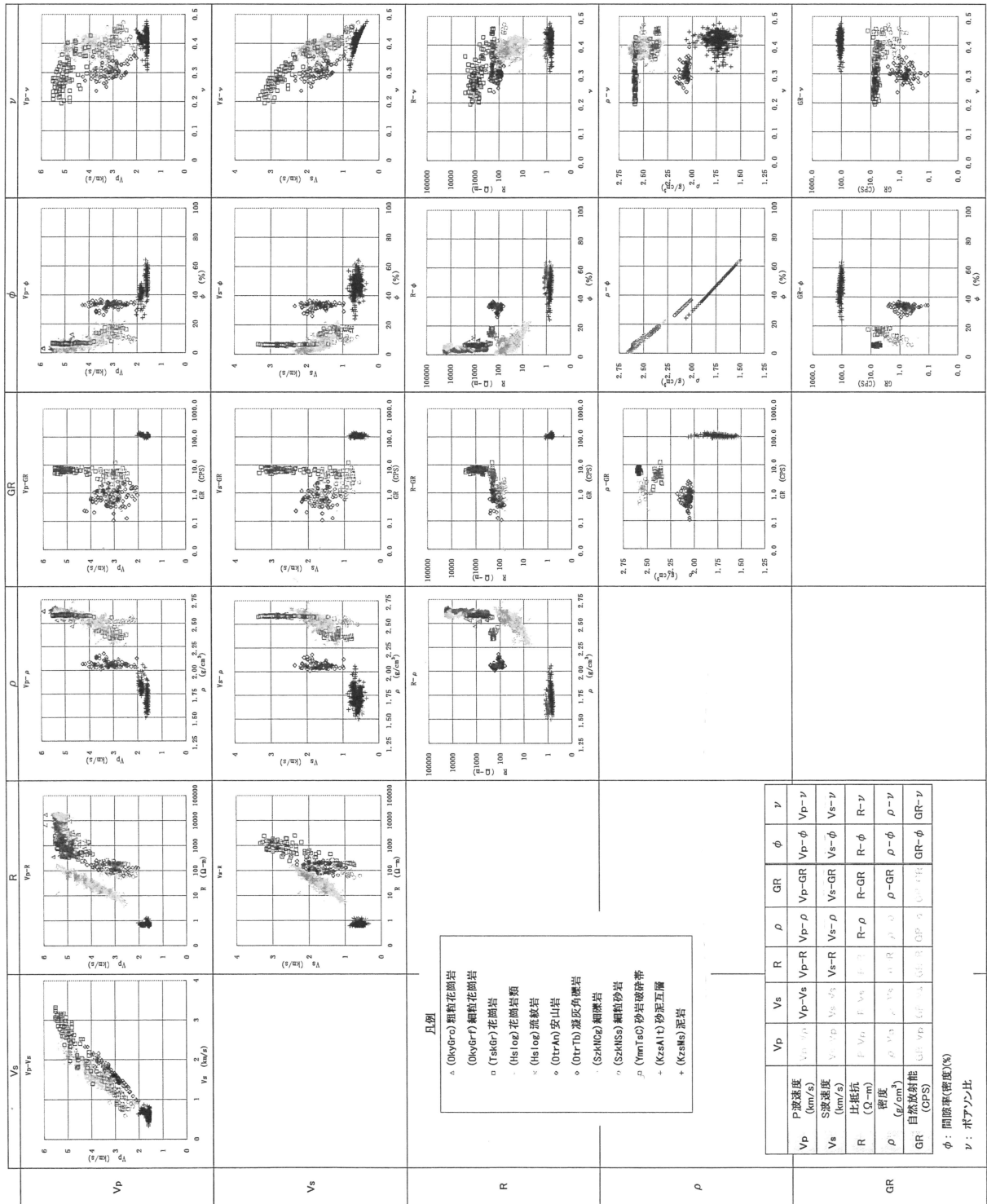


図 11 収集した検層全データの物性分布



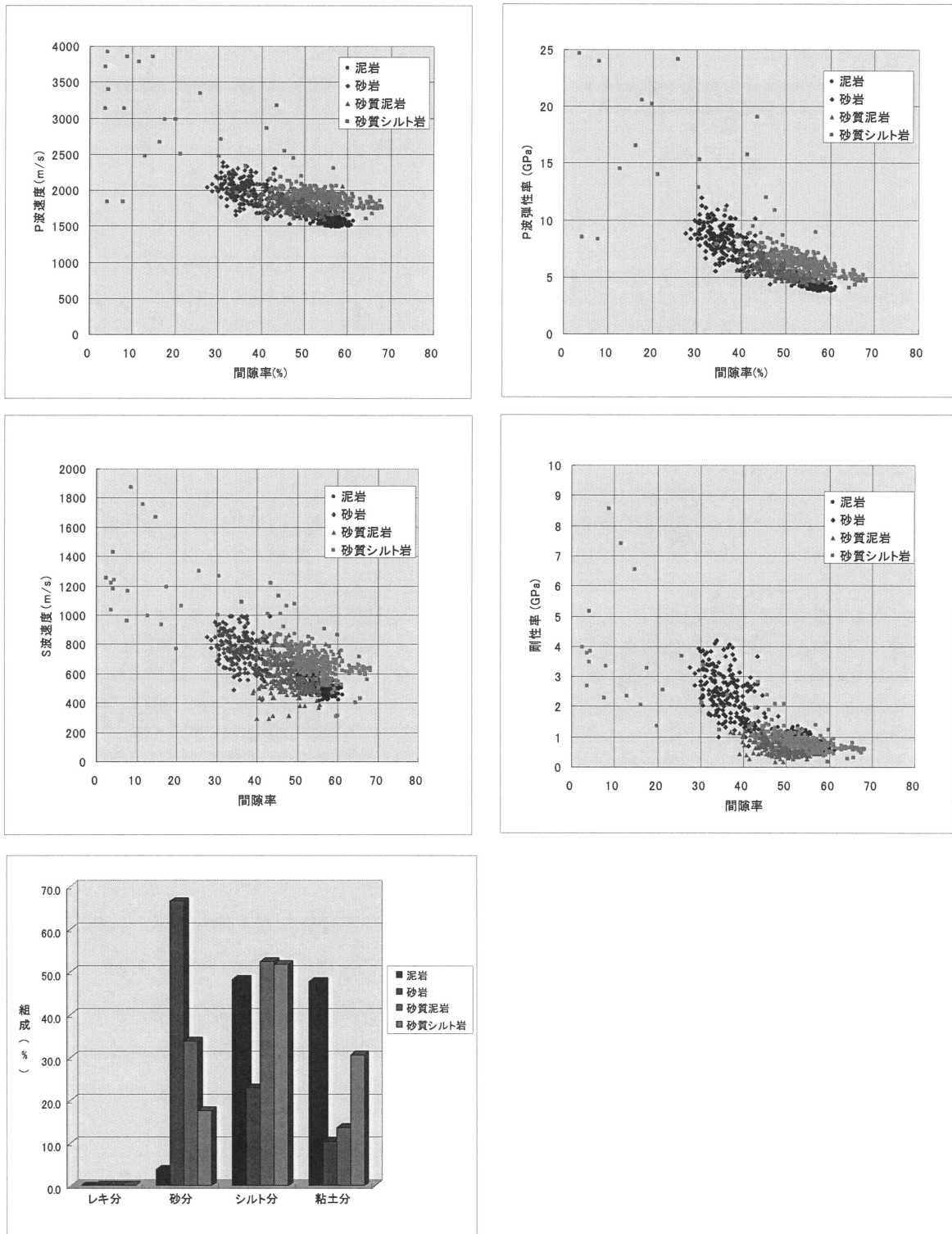


図 12 新第三紀砂質泥岩データの P 波速度，S 波速度，P 波弾性率，剛性率と間隙率の関係  
(参考のため粒度分布も合わせて示した)

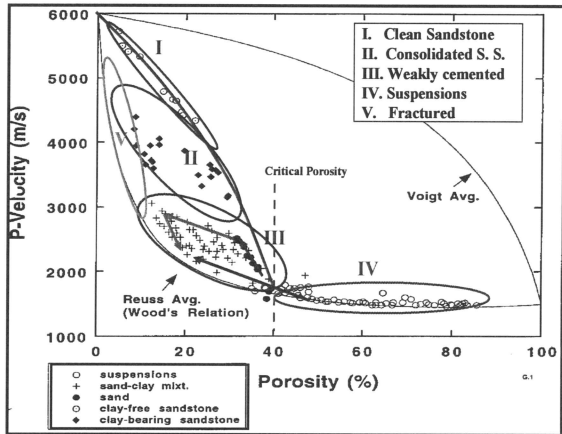


図 13 弾性波速度—間隙率の関係と岩石モデル

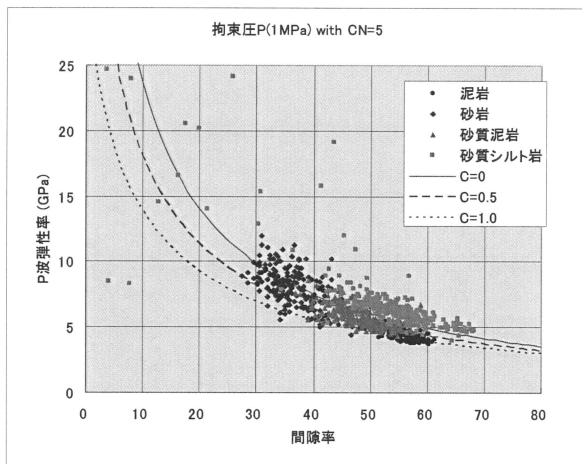


図 14 P 波弾性率(計算値と実測値)

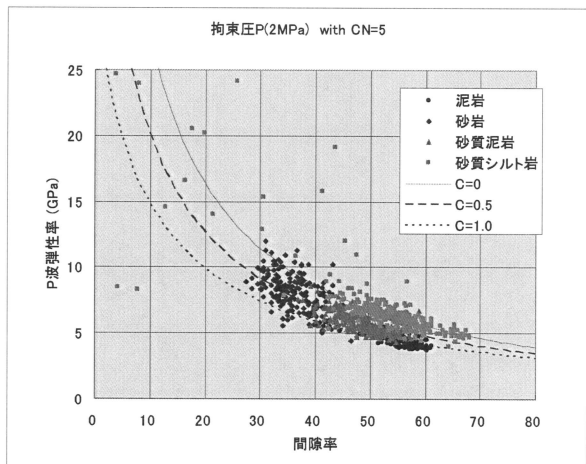


図 15 P 波弾性率(計算値と実測値:拘束圧 2MPa)

(計算に使用した定数:  $K=36.6\text{GPa}$ ,  $G=45\text{GPa}$ , 臨界間隙率=80%, 配位数: 5)

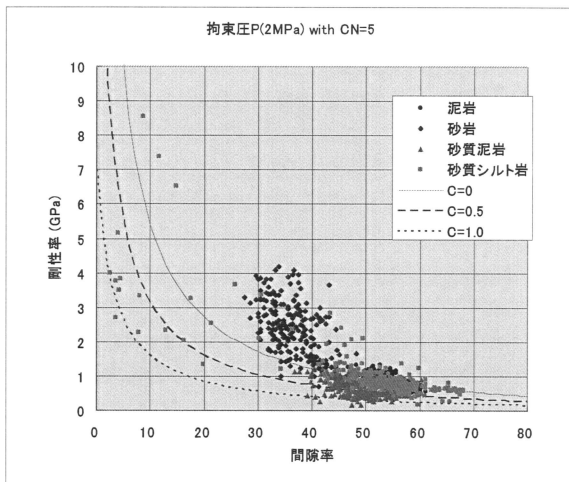


図 16 剛性率 (計算値と実測値: 2MPa)

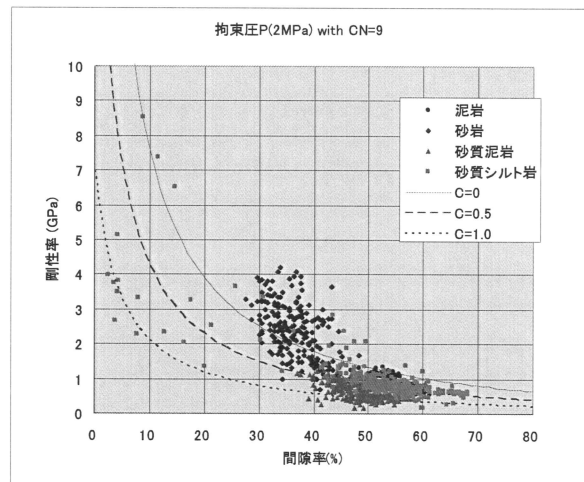


図 17 剛性率 (計算値と実測値: 配位数: 9)

これらの結果は、国内の代表的な堆積岩である新第三紀の砂質泥岩の場合、既往の粒状体モデル Friable Sand Model でモデル化することが可能であることを示している。

(2) 花崗岩への適用結果

上記と同様に、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。このデータの場合、S波データが無いので、P波特性だけを用いて検討を行う。

図 18 に実測データの P 波速度と間隙率の相関図を示す。これを上述した既往モデルを表した相関図 13 と比較すると、花崗岩の場合には、フラクチャー型モデルの当てはめが適当であることがわかる。

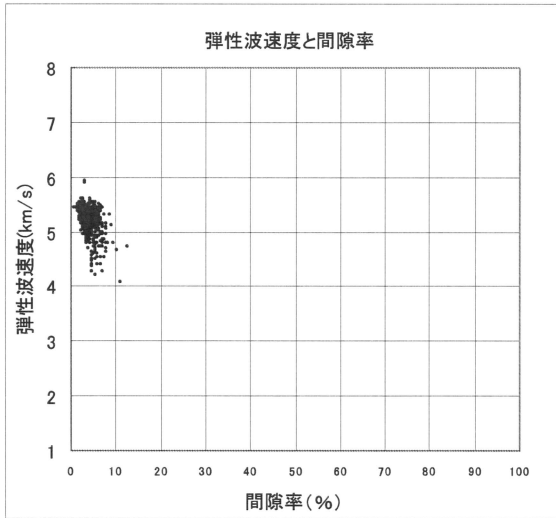


図 18 P 波速度と間隙率の関係

フラクチャー型のモデルとして、ここでは、有効媒質モデルの中の Kuster-Toksoz モデル (Kuster and Toksoz, 1974) の適合度を評価した。このモデルは、均質な基質の中に、フラクチャー(亀裂)がランダムに分布するモデルであり、適用性の広いモデルである。

亀裂を含む岩石の体積弾性率 K と剛性率 G は

以下の式により計算される。なお、ここでの計算では、間隙は水で飽和されているとする。

$$K = \frac{4PGs + Ks(3Ks + 4Gs)}{3Ks + 4Gs - 3P}$$

$$G = \frac{5Gs^2(3Ks + 4Gs) + QGs(9Ks;8Gs)}{5Gs(3Ks + 4Gs) - 6Q(Ks + 2Gs)}$$

$$P = \frac{\phi}{3}(Ki - Ks)T_{ijj}$$

$$Q = \frac{\phi}{5}(Gi - Gs)(T_{ijj} - \frac{1}{3}T_{ijj})$$

$$T_{ijj} = \frac{3F1}{F2}$$

$$T_{ijj} - \frac{1}{3}T_{ijj} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4F_5 + F_6F_7 - F_8F_9}{F_2F_4}$$

$$F_1 = 1 + A \left\{ \frac{3}{2}(E + D) - C \left( \frac{3}{2}E + \frac{5}{2}D - \frac{4}{3} \right) \right\}$$

$$F_2 = 1 + A \left\{ 1 + \frac{3}{2}(E + D) - \frac{C}{2}(3E + 5D) \right\} + B(3 - 4C) + \frac{A}{2}(A + 3B)(3 - 4C) \{ E + D - C(E - D + 2D^2) \}$$

$$F_3 = 1 + \frac{A}{2} \left\{ C(2 - D) + \frac{1 + \phi^2}{\phi^2} E(C - 1) \right\}$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4} \{ 3D + E - C(E - D) \}$$

$$F_5 = A \left\{ C \left( E + D - \frac{4}{3} \right) - E \right\} + BD(3 - 4C)$$

$$F_6 = 1 + A \{ 1 + E - C(E + D) \} + B(1 - D)(3 - 4C)$$

$$F_7 = 2 + \frac{A}{4} \{ 9D + 3E - C(5D + 3E) \} + BD(3 - 4C)$$



$$F_8 = A \left\{ 1 - 2C + \frac{E}{2}(C-1) \right\} + \frac{D}{2}(5C-3) + B(1-D)(3-4C)$$

$$F_9 = A \{ E(C-1) - CD \} + BD(3-4C)$$

$$A = \frac{Gi}{Gs} - 1$$

$$B = \frac{1}{3} \left( \frac{Ki}{Ks} - \frac{Gi}{Gs} \right)$$

$$C = \frac{3Gs}{3Ks - 4Gs}$$

$$D = \frac{\alpha}{(1-\alpha^2)^{3/2}} \{ \cos^{-1} \alpha - \alpha(1-\alpha^2)^{1/2} \}$$

$$E = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} (3D-2)$$

ここに、

$K_s$  : 花崗岩基質の体積弾性率(GPa)

$G_s$  : 花崗岩基質の剛性率(GPa)

$K_i$  : 孔隙の体積弾性率 (水の場合 : 2.25GPa)

$G_i$  : 孔隙の剛性率(=0GPa)

$\Phi$  : 全空隙率 (インクルージョンの体積分率)

$\alpha$  : アスペクト比 (回転楕円体として近似)

求められた弾性率  $K$  と  $G$  を用いて、飽和状態の岩石の弾性波特性を以下の式から求める。

$M(\Phi) = K + 4G/3$  : P波弾性率

$G(\Phi) = G$  : 剛性率

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

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

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

$\rho_s$  : 花崗岩基質の密度

$\rho_f$  : 流体 (水) の密度

図 19 に、このモデルで計算された理論値との比較を示す。図中には、境界線法(Mavko et al.,1998)と呼ばれる手法で計算したデータの取得範囲も同時に示した。図からわかるとおり、花崗岩データのP波速度と空隙率の関係については、このモデルで説明ができそうなことがわかる。ただ、このモデルでは、フラクチャー (亀裂) の形状を表すアスペクト比の値によって理論値が大きく変化する。図 20 は、アスペクト比の値を変化させた場合の理論値の変化を示している。実際

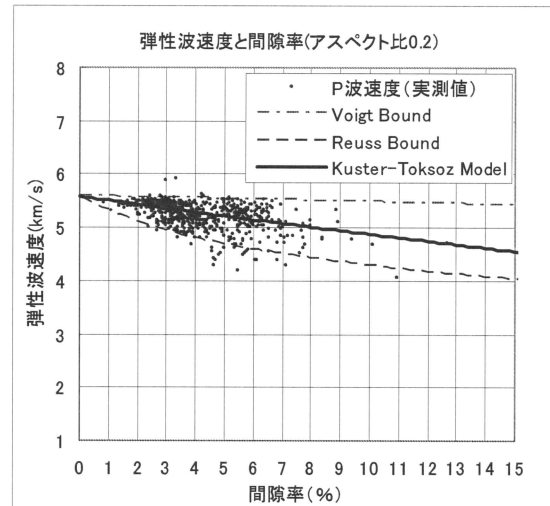


図 19 P波速度 (計算値と実測値)

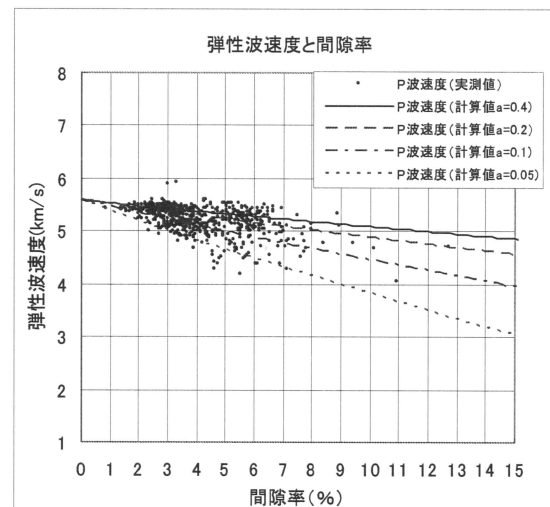


図 20 P波速度 (計算値と実測値:アスペクト比との関係)

の岩石は様々なアスペクト比を持ったフラクチャーからなると思われるので、アスペクト比の設定法を含め、今後このモデルについても検討が必要であると思われる。

### (3) 適合性評価の試行結果のまとめ

日本に特有の岩石として、堆積軟岩として新第三紀泥質岩、結晶質岩として花崗岩を用いて既往モデルの適合性の評価を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・堆積岩（新第三紀砂質泥岩）の場合：
  - ・既往の粒状体モデルの適用可能性が高い。
  - ・ただし、間隙率（配位数）、粘土含有量、深度など、モデル適合上鋭敏なパラメータについての検討が必要。
  - ・特に、工学的により重要なS波速度や剛性率（強度）を精度よく予測するためには、モデルの改良やパラメータについての検討が必要。
- ・結晶質岩（花崗岩）の場合：
  - ・花崗岩を亀裂性媒質として考え、既往のインクルージョン（有効媒質）モデルの適用が考えられるが、亀裂密度やランダム性などの制約条件についての検討が必要。
  - ・亀裂性媒質としてモデル化した場合、亀裂形状が鋭敏なパラメータであり、その設定方法に関する検討が必要。

### おわりに

ロックフィジックスは、地下の定量的なモデル化にとって極めて重要な基礎技術の1つであるが、地質、地盤、岩盤工学分野においては、ロックフィジックスによる地盤のモデル化の重要性は認識されてはいるものの、国内の様々な岩種に適用可

能な岩石モデルが研究されていない、また、研究に必要な質の高い岩石物性データを容易に入手できるインフラが整備されていないなどの理由で、実務レベルではほとんど利用されていないのが現状である。

本研究では、研究に必要なインフラとしてのデータベースの構築と国内の代表的な岩種についての岩石モデルの適用性に関する予備的な解析を行った。現時点で入手可能な岩石物性データの収集、整理を終えることができたが、データ数が限られており、今後も引き続きデータの拡充、更新を行っていく必要がある。国内の代表的な岩種として新第三紀砂質泥岩と花崗岩について既往の岩石モデルの適用性の評価に関して予備的な解析を行った結果、泥岩については、石油・ガス探査開発分野で砂岩貯留岩のモデルとして研究されてきた粒状体モデルの適用性が高いことが確かめられたが、亀裂性岩石である花崗岩については、今後検討すべき課題は多い。

今後は、引き続き各種岩石の物性データの収集を続けるとともに、収集した物性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。

### 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

- Archie, G.E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. Ann. Inst. Mech. Eng.*, 146, 54-62.
- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. (2005): *Quantitative seismic interpretation*, Cambridge University Press.
- 物理探査学会(1998)：物理探査ハンドブック
- Dvorkin (2001): Technical notes on rock physics  
羽竜忠男, 西川貢, 伝法谷彰人(2001)：間隙率-飽和度トモグラフィー ( $\phi$ - $S_w$  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
- 小西千里, 東宏幸, Jack Dvorkin, 荻沼真之 (2007)：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.
- Kuster, G.T. and Toksoz, M.N. (1974): Velocity and attenuation of seismic waves in two phase media, *Geophysics*, 39, 587-618.
- 松岡俊文 (2006)：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.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J. (1998): *The rock physics handbook*, Cambridge University Press.
- Raymer, L.L., Hunt, E.R., Gardner, J.S. (1980) : An improved sonic transit time-to-porosity transform, *Trans. Soc. Prof. Well Log Analysts*, 21<sup>st</sup> Annual Logging Symposium, Paper P.
- 須藤宏, 田中利和, 近藤達敏(2005)：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.
- 鈴木浩一, 木方建造, 宮川公雄, 岡田哲実(2000)：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.
- 高倉伸一(2003)：アーチの式と並列回路, CA 研究会, 127.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W. (1956): Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, 21, 41-70.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, G.H.F. (1958): An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media, *Geophysics*, 23, 459-493.

