

DH-6, 7, 8号孔における力学特性調査結果

平成11年9月

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

地層科学研究グループ

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

核燃料サイクル開発機構

東濃地科学センター

地層科学研究グループ

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Geoscience Research Execution Group

Tono Geoscience Center,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-5102,

Japan

核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

DH-6, 7, 8 号孔における力学特性調査結果

松井裕哉*、佐藤稔紀**

要旨

本調査は、核燃料サイクル開発機構が岐阜県東濃地域で実施している広域地下水流動調査研究の一環として掘削した DH-6 ~ 8 孔にて実施したものである。その目的は、堆積岩層及び基盤花崗岩の力学的特性を把握し、広域的な地質構造概念モデル等の構築に当たっての岩盤物性に関する情報を提供することである。

調査項目は、堆積岩及び土岐花崗岩を対象とした物理的/力学的/熱的特性に関する各種室内試験及び AE/DRA 法による鉛直応力測定である。DH-6~8 孔内とも、原則的に約 50m ピッチで岩石供試体を採取し、上記室内試験を実施した。得られた結果の概要を以下に記す。

- 1) DH-6 ~ 8 孔における室内物性試験及び力学試験結果から、土岐花崗岩の各物性値の深度方向の分布は一様ではなく、その分布傾向が 400 ~ 500m 地点、700 ~ 800m 地点で変化することがわかった。
- 2) DH-6,7,8 孔における AE/DRA 法による鉛直応力測定結果は、地表~深度 1000m 程度まで範囲では、鉛直方向の応力成分が土被り圧とほぼ等しい結果を得た。また、超深地層研究所建設予定地点に掘削した MIU-1 孔でも同様の結果であったことから、土岐花崗岩体中の鉛直応力成分はほぼ全域で土被り圧と等しいと推定することができる。しかし、AE/DRA 法の試験を実施した 4 孔(DH-6~8 孔、MIU-1 孔)すべてについて、局所的には鉛直応力が土被り圧と一致しない部分が認められ、これは土岐花崗岩体中に水平方向に広がる不連続構造が存在する可能性を示唆していると考えられる。
- 3) 土岐花崗岩においては、物性値の深度方向の変化や割れ目分布と岩相の違いにほとんど相関関係が認められていない。これは、物性値分布や割れ目分布の違いが、地質学的な岩相分布の違いよりもむしろ地殻変動などによる広域的な応力状態の変化によってもたらされている可能性を示していると思われる。

* 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地層科学研究グループ

** 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地質環境情報グループ

The results of the investigation on rock mechanical properties in Toki granite using cores from DH-6, 7 and 8 boreholes

Hiroya MATSUI*, Toshinori SATO**

Abstract

The rock mechanical investigations on Toki granite have been carried out from 1997 to 1998 as a part of the investigations in the regional hydrogeological study in Tono area. The objectives of the investigation are to supply the support data for developing of the conceptual geological/hydrogeological model in large scale(10km×10km)

The investigations in DH-6,7 and 8 consist of two part :

- ①Laboratory tests for the physical/mechanical/thermal properties of rock matrix in Toki granite
- ②In-situ stress measurement in laboratory with AE and DRA methods

The results of the investigations are summarized as follows :

- 1) The distribution of rock physical/mechanical properties for DH-6,7,8 is not uniform from surface to 1000m depth. The trend of the distribution of the rock properties varies at about 400~500m and 700~800m.
- 2) The vertical component of stress tensors are almost equal to the overburden pressure based on the results of stress measurement with AE and DRA methods for DH-6,7 and 8. The results correspond with those in MIU-1. According to the both results, the vertical component of stress tensors can be assumed to be equal to the overburden pressure in Toki granite. The vertical component of stress tensors at several depth in DH-6,7,8 and MIU-1 boreholes is not equal to the overburden pressure. This result suggests that there are large discontinuities horizontally in the Toki granitic body.
- 3) There are no correlation between rock properties , fracture distribution and rock type. The results suggest that the complex variation of rock properties and fracture distribution with depth may be induced by the variation of regional stress field.

* Japan Nuclear Cycle development institute (JNC)

Tono Geoscience Center Geoscience Research Execution Group

** Japan Nuclear Cycle development Institute(JNC)

Tono Geoscience Center Geological Environmental Research Group

目次

	ページ
1. はじめに	1
2. 目的	1
3. 調査位置及び地質構造	1
4. 力学特性調査に関する調査項目	4
5. 調査結果	6
5.1 室内物理試験及び力学試験結果	6
5.2 初期応力測定結果	23
6. 考察	25
6.1 AN-1 号孔および MIU-1 号孔で実施した力学特性調査との比較	25
6.2 地質構造と岩盤物性値及び応力状態との関係について	35
7. まとめ	38
8. 今後の予定	38
9. 参考文献	39

1.はじめに

核燃料サイクル開発機構は、岐阜県東濃地域を対象として広域地下水流動調査研究¹⁾を実施している。地下水流動研究において重要となる地下水の涵養域～流出域という一つの区分を検討した結果に基づき、超深地層研究所建設予定地点を含む図 2.1 に示す約 10km 四方の領域を調査対象領域とした。現在、この 10km 四方の領域において深度 500～1000m 級の試錐孔を十数本掘削し、岩盤の透水性や物性、地下水圧、地下水の地球化学的調査を実施している。

本資料は、本研究の一部として実施した DH-6,7,8 号孔における土岐花崗岩の力学特性に関する調査結果をとりまとめたものである。

2.目的

本調査の目的は、堆積岩層及び基盤花崗岩の力学的特性を把握し、広域的な地質構造概念モデル等の構築に当たっての岩盤物性に関する情報を提供することである。

3.調査位置及び地質構造

広域地下水流動調査研究において対象とした調査対象領域は、図 3.1 に示す 10km×10km の領域である。平成 10 年度までに、広域地下水流動研究では、計 9 本の試錐孔 (DH-1~9 孔) を掘削しているが、力学特性に関する調査は、DH-6 孔より開始した。図 3.2 に地質図上に試錐孔の位置を示したものを示す。各試錐孔は、いずれも基盤となる土岐花崗岩体を貫く深度 1000m の試錐孔であり、場所により異なるが最大数百 m 程度の堆積岩層が分布する。DH-6～8 孔は広域地下水流動研究の対象領域の西側境界部付近に位置している。DH-6 孔は美濃帯堆積岩体と土岐花崗岩の境界部に、DH-7 孔は南北系断層 (名称未定) の延長上に、DH-8 号孔は次月断層と呼ばれる南北系断層の延長上に掘削しており、それぞれ岩体境界部や調査対象領域内の断層に関する種々のデータを取得することを目的としている。また、これらの試錐孔は南北方向では、月吉断層と呼ばれる逆断層の下盤側に位置している。月吉断層は、今から約 500 万年前よりも過去に活動したと考えられる傾斜 70° のほぼ東西方向の走向を有する逆断層である。鉛直方向の変位は約 30m と言われている。

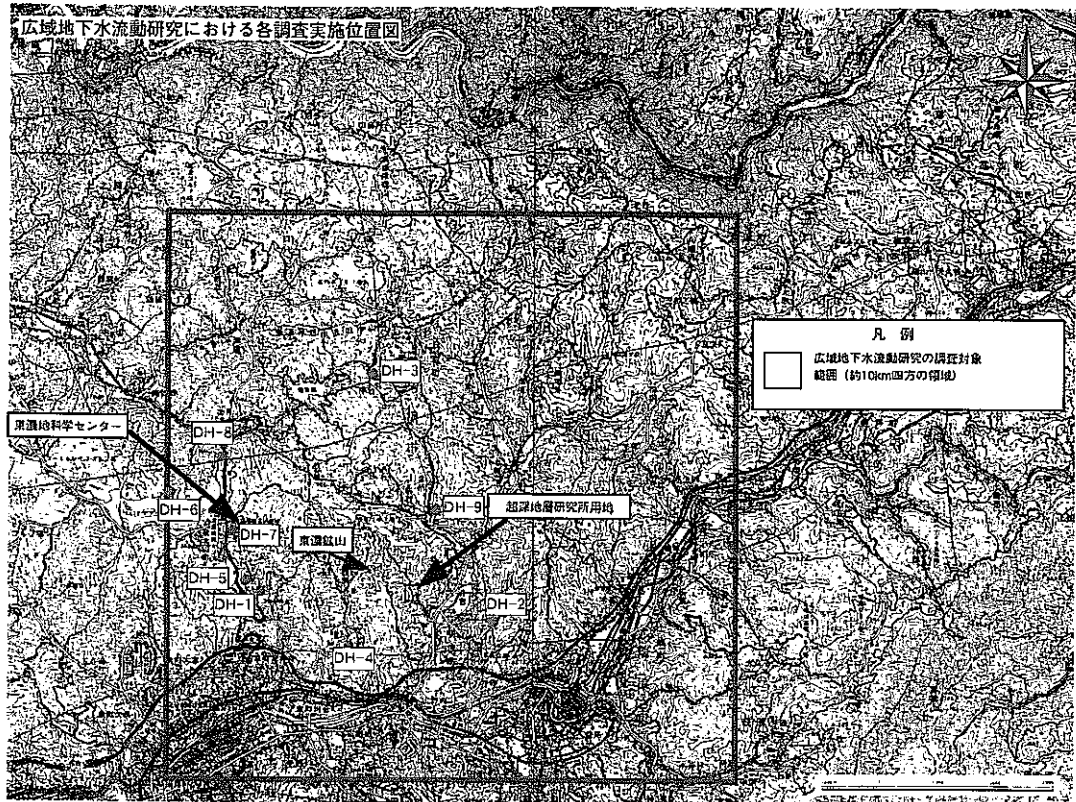


図 3.1 広域地下水流動調査対象領域及び試錐孔配置図

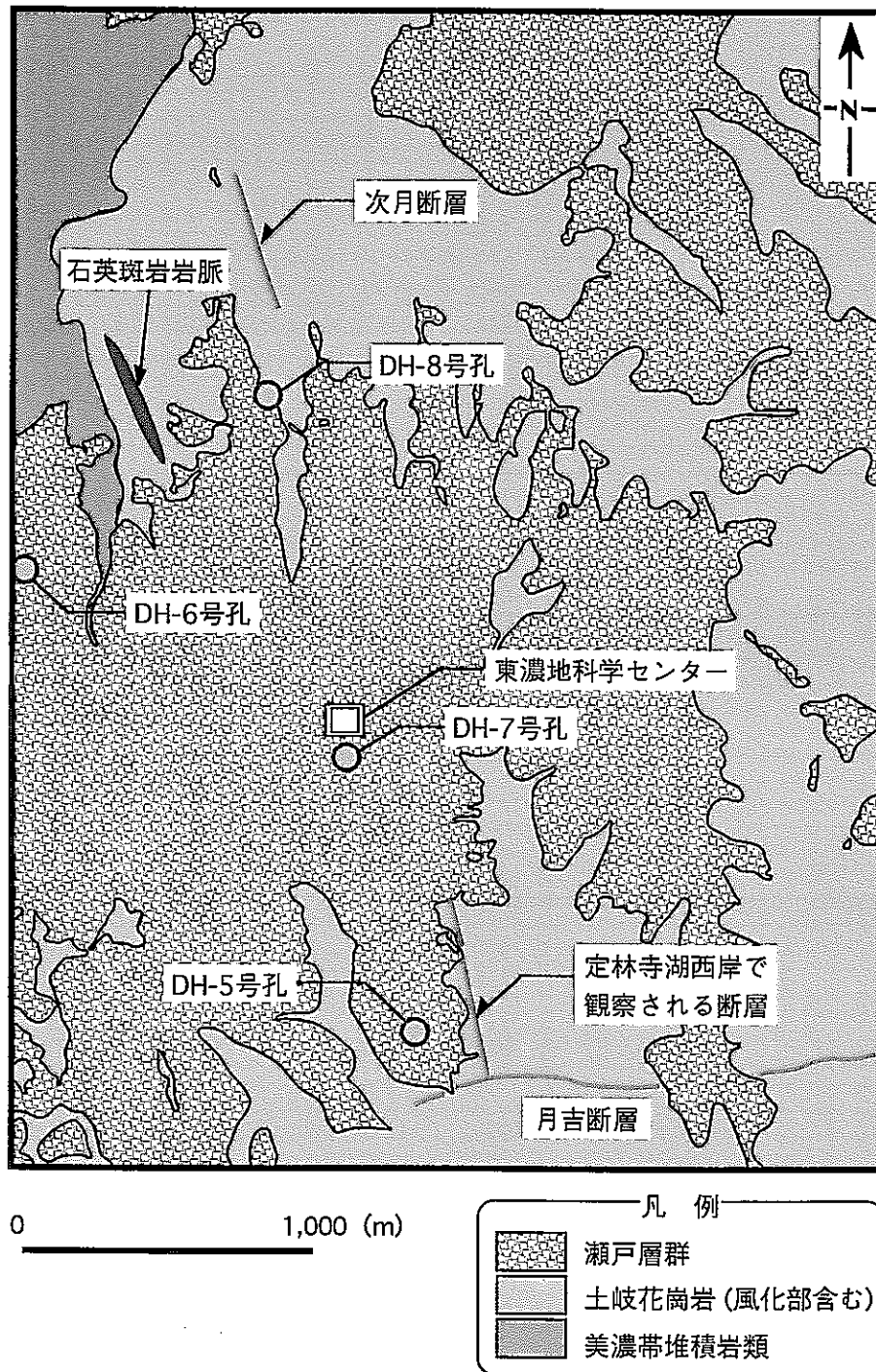


図 3.2 地質及び試錐孔配置図(DH-5,6,7,8 孔)

4.力学特性に関する調査項目 2),3),4)

DH-6 ~ 8 孔から採取した岩石コアを用いて、室内物性試験及び AE/DRA 法による鉛直応力成分の測定を実施した。

本調査では、主として深度方向の物性値分布を把握するため、原則として 100m ピッチで健岩部を対象にサンプリングを実施し、室内物性試験及び応力測定を実施した。室内物性試験にて使用した試験手法等の仕様を表 4.1 に示す。

表 4.1 室内物理試験及び力学試験の仕様一覧

	試験名	試験項目	試験仕様	数量			備考
				DH-6	DH-7	DH-8	
DH-6,7,8孔	物理試験	空隙率	ISRMの指針に準拠	110	113	110	物理試験は、一軸圧縮供試体のみ
		含水比	ISRMの指針に準拠	110	113	110	
		カサ比重	ISRMの指針に準拠	110	113	110	
		見かけ比重	ISRMの指針に準拠	110	113	110	
		弾性波速度測定 (P,S波)	受発信子 200kHz	90	93	90	
	力学試験	一軸圧縮試験	荷重制御(0.3MPa/s) 軸ひずみ、横ひずみはひずみゲージにより測定	30	33	30	供試体形状・寸法 形状：円柱 寸法： 縦横比 2:1 (一軸,三軸) 縦横比 1:1 (圧裂)
		圧裂引張試験		20	20	20	
		三軸圧縮試験	荷重制御 (0.3MPa/s)	60	60	60	
	熱特性試験	熱伝導率測定	非定常細線加熱比較法 (測定範囲:室温~70°)	20	20	20	
		比熱容量測定	断熱連続加熱法 (測定 範囲:室温~300°)	20	20	20	
		熱膨張率測定	押し棒式熱膨張測定法 (測定範囲:室温~300°)	20	20	20	
	その他の 物性試験	比抵抗測定	送受信機: 千葉電子CH800	20	20	20	
		帯磁率測定	測定器: Bison Model-3101A	20	20	20	

AE/DRA 法による岩石コアを用いた鉛直応力成分の測定は、岩体内での応力分布に特異性がないかどうかを判断するための一つの指標として実施している。鉛直方向応力は、一般に土被り圧に等しくなると言われており、それが満たされない場合は地殻応力の不均一性や断層や局所的な岩層変化等の地質構造特性を反映したものになる可能性が高いため

ある。本調査における AE/DRA 法の測定仕様を表 4.2 にまとめて示す。

表 4.2 初期応力測定仕様一覧

	測定手法	数量	使用機器	備考
DH-6,7,8孔	AE法	37個 (DH-6孔) 供試体採取深度(m) 92.65~94.1 205.1~205.9 298.1~298.6 446.3~446.78 486.54~487.67 599.65~600.01 709.42~709.78 871.5~872.07 945.06~945.61 994.24~994.6	スクレイドドライブ式材料試験機 1台 (最大圧縮容量10t) AE計測器 1台 (トランスデューサ--500kHz共振型、プリアンプ40dB固定)	AE法: ローパスフィルター 500kHz。 試料採取後2日以内に測定を実施
		41個 (DH-7孔) 供試体採取深度(m) 186.4~186.8 411.2~420.9 474.05~474.79 540.72~541.08 622.28~624.14 688~688.36 766.14~766.5 841.3~841.66 914.42~914.24 984.72~985.02	ひずみ測定器 1台 (TDS-301) オシロスコープ 1台 (DS-6121A) 制御システム (パソコン) 1台 (PC-9801RX)	DRA法:4枚のひずみゲージを2枚1組として温度補正のためのダメージゲージとブリッジを組み、二つのブリッジからの出力は、それぞれ動ひずみ計で増幅した後に直列接続して加算した。 すなわち、一枚のゲージによる測定感度の4倍の感度のひずみ計測を実施。
	45個 (DH-8孔) 供試体採取深度(m) 164.1~164.3 249.3~249.9 311~311.4 407~407.36 501~501.36 620.85~621.21 690.5~690.86 770.62~770.86 848.6~848.96 905.52~905.93 1002.5 ~1003.22	ロードセル 1台 (LU-5TE、容量5t) ひずみゲージ (PFL-10-11)	応力測定は、各試験深度毎に3~5供試体を採取し実施。すべての供試体について、見かけ比重と弾性波速度を測定。	

5.調査結果

5.1 室内物理試験及び力学試験結果

(1)DH-6号孔のコアを用いた室内力学試験結果²⁾

図 5.1.1~5.1.4 は、取得した各物性値と深度との関係を示したものである。DH-6 号孔においては、砂質～泥質ホルンフェルス、石英斑岩、花崗岩という大きく 3 種類の岩石について室内試験を実施している。砂質～泥質ホルンフェルスの部分は、花崗岩及び石英斑岩と比較すると明らかに異なる物性を有しており、見かけ比重が大きく(2.65~2.8)、空隙率が非常に小さい(0.4%以下)。力学的物性については、弾性係数と圧裂引張強度及び粘着力が花崗岩にくらべ大きく、内部摩擦角は逆に小さい。石英斑岩の部分については、物理的性質は花崗岩部と大差ないが、力学的性質については弾性係数、一軸圧縮強度、粘着力は花崗岩より大きく、内部摩擦角及びポアソン比は小さい。

花崗岩の物性値は以下に示すような範囲に分布している。

見かけ比重	: 2.60~2.67
有効空隙率	: 0.1~2.0%
P波速度	: 3.7~5.2km/sec 程度
弾性係数(E_{50})	: 55~82GPa
一軸圧縮強度	: 130~280MPa
ポアソン比	: 0.21~0.34
粘着力	: 11~24MPa
内部摩擦角	: 51~61°

ここでは、深度方向の測定データのバラツキが大きいことから、取得された各物性値と深度の関係をより明確にするために、相対的に最も相関係数の値が高い 4 次多項式で近似した結果も図中に並記している。

図 5.1.1 に示す物理的性質に関しては、400~700m の区間とそれ以深で変化の傾向が異なるように見える。深度 400~700m 区間では、見かけ比重、空隙率とも深度変化に対応した大きな変化は認められないが、弾性波速度は若干増加する傾向を示す。700m 以深では、見かけ比重、空隙率ともに増加し、弾性波速度は著しく低下する傾向を示す。また、力学特性においては、深度 400~700m 区間では、弾性係数、圧裂引張強度、粘着力、内部摩擦角は深度とともに増加する傾向を示し、それ以深では逆に減少する。一軸圧縮強度については深度方向に大きな変化は認められず、ポアソン比については深度に伴い増加する傾向がある(図 5.1.2)。

図 5.1.3 に岩石の物理的特性と力学的特性との相関性(花崗岩部のみ)を検討した結果

を示す。一軸圧縮強度と弾性波速度、一軸圧縮強度の 50%接線弾性係数(E_{50})と弾性波速度との相関性は低い(相関係数: 0.09, 0.48)が、それ以外のパラメータについては相関性は相対的に高い(相関係数 0.5 以上)。傾向としては、空隙率が増加すると E_{50} は減少する。また、見かけ比重の増加に伴い、 E_{50} 及び一軸圧縮強度は低下する傾向にある。ポアソン比は、空隙率と見かけ比重の増加に伴い大きくなり、弾性波速度の増加に伴い減少する傾向にある。

熱特性についての試験結果を図 5.1.4 に示す。花崗岩の比熱は 400~700m までは深度方向に変化はなく、深度 700m 以深が小さくなっている。熱伝導率と線膨張係数は、測定温度によっても異なるため深度方向の変化傾向は十分把握できない。また、熱特性に関しては、ホルンフェルス、石英斑岩と花崗岩の間に大きな違いはない(図 5.1.4)。

帯磁率については、岩種の違いによる差はなく概ね $0.2\sim 0.6E^{-3}$ SI であるが、深度 700m 及び 1000m 付近で測定値が大きくなっている。比抵抗については、花崗岩は $5000\Omega \cdot m$ よりも低い値であるが、石英斑岩及びホルンフェルスは $10000\sim 30000\Omega \cdot m$ の値を示しており、岩種の違いによる差が明瞭に認められる(図 5.1.4)。

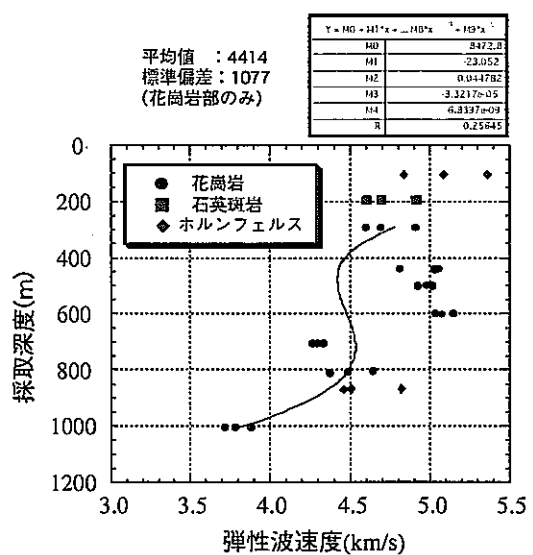
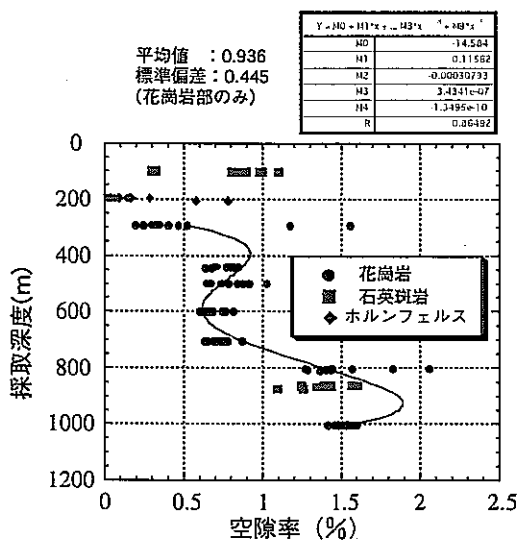
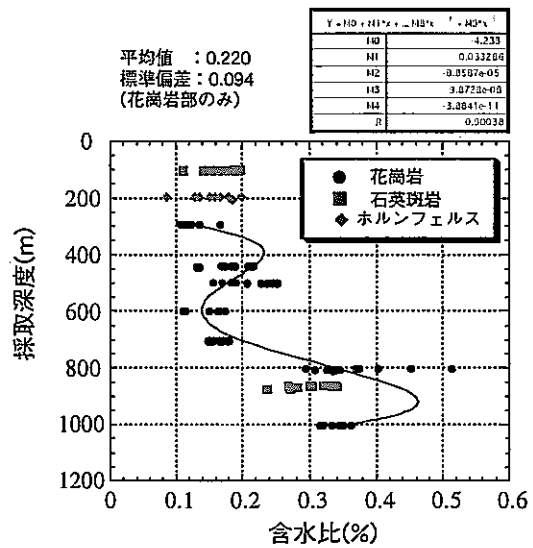
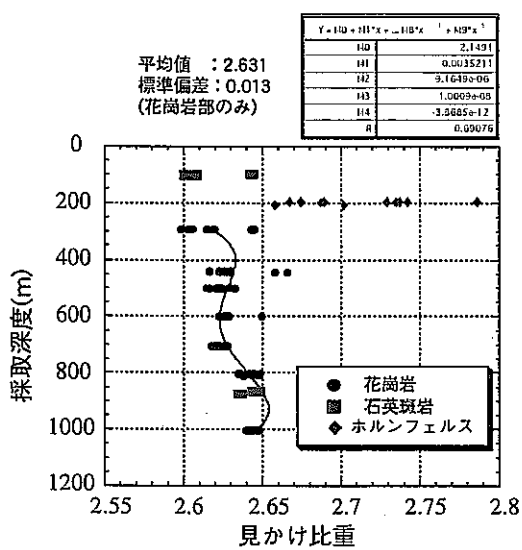


図 5.1.1 岩石コアの物理特性の深度変化(DH-6 孔)

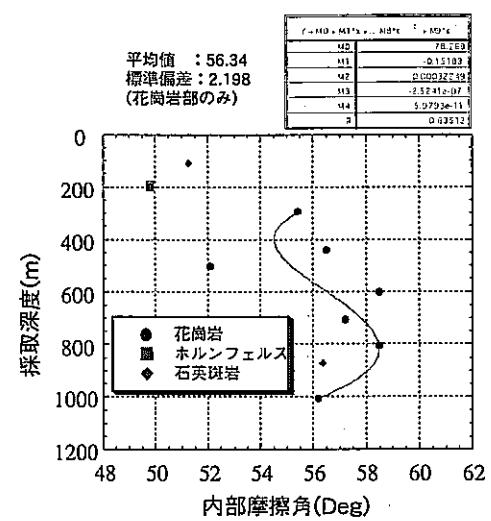
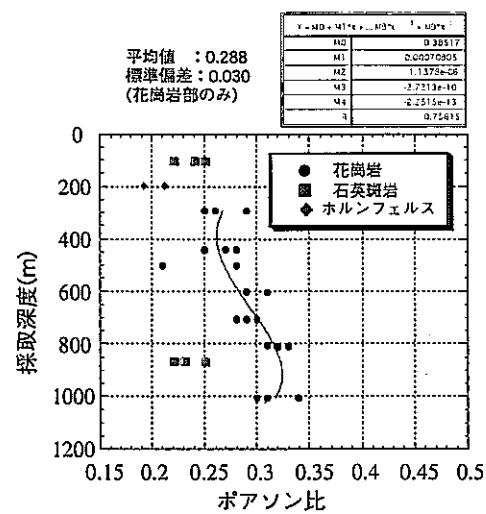
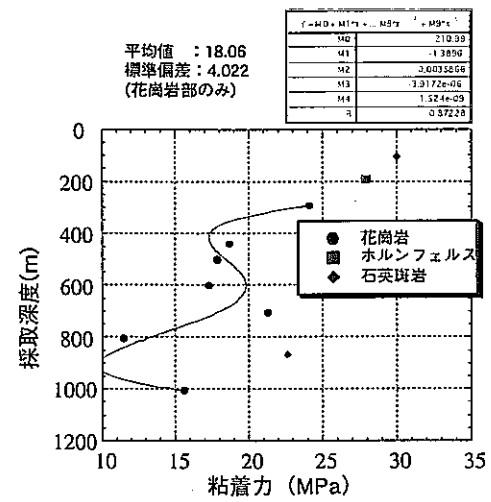
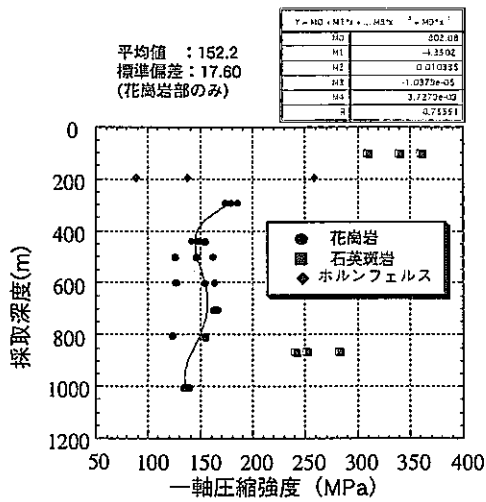
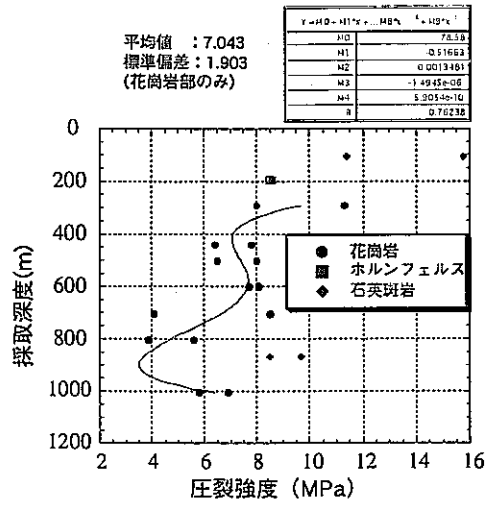
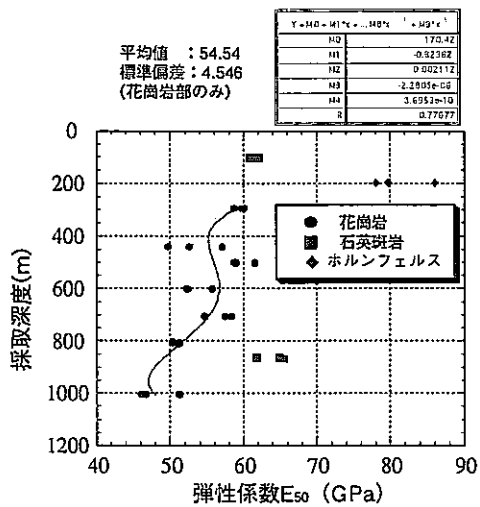


図 5.1.2 岩石コアの力学特性の深度変化(DH-6 孔)

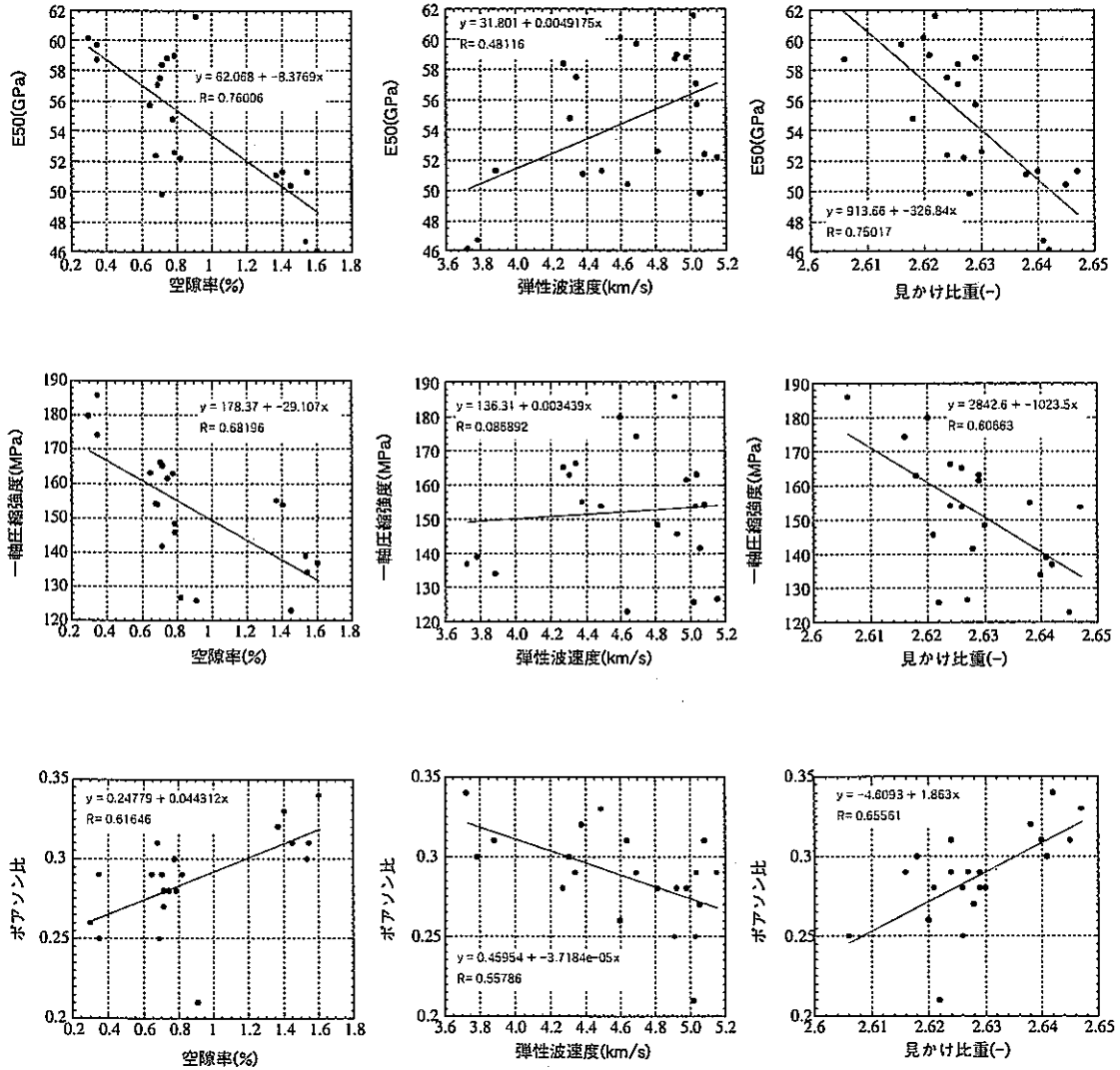


図 5.13 物理特性と力学特性の相関性(DH-6 孔)

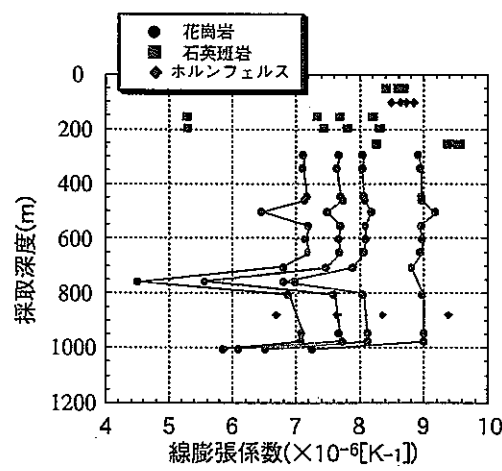
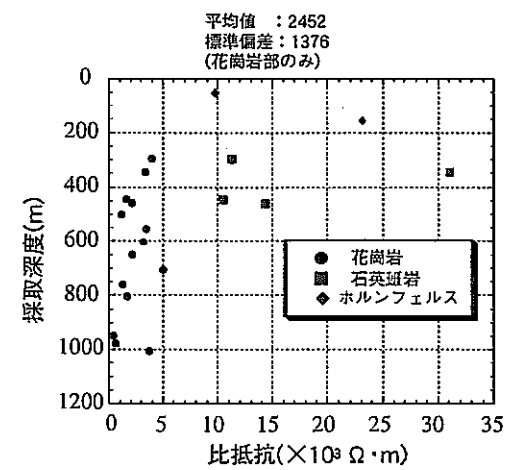
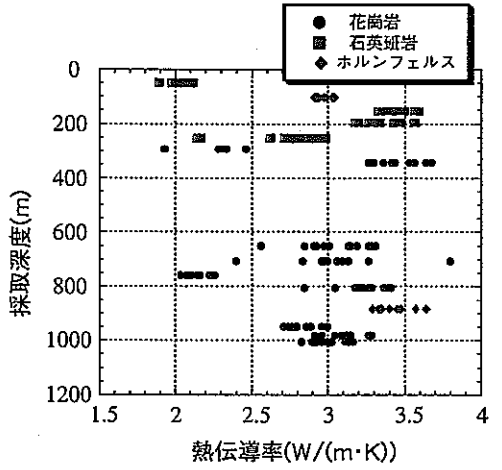
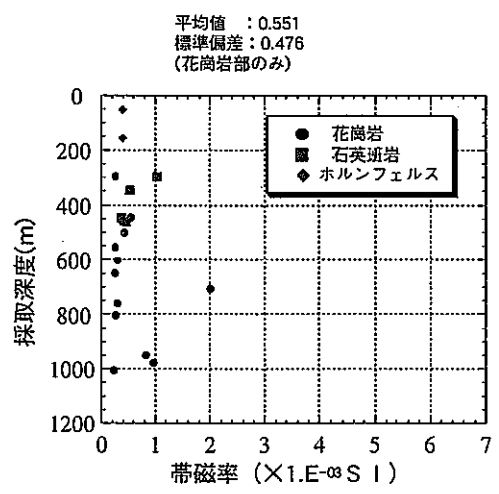
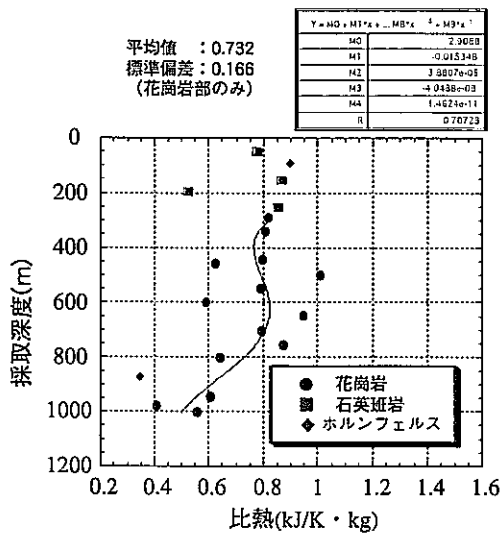


図 5.1.4 岩石コアの熱特性/帯磁率/比抵抗の深度変化 (DH-6 孔)

(2)DH-7 号孔のコアを用いた室内力学試験結果³⁾

図 5.1.5~ 5.1.8 は、取得した各物性値と深度との関係を示したものである。DH-7 号孔においては、石英斑岩、花崗岩という大きく 2 種類の岩石について室内試験を実施している。花崗岩の物性値は以下に示すような範囲に分布している。

見かけ比重	: 2.59~2.65
有効空隙率	: 0.6~2.4%
P 波速度	: 3.6~5.0km/sec 程度
弾性係数(E_{50})	: 50~70GPa
一軸圧縮強度	: 130~370MPa
ポアソン比	: 0.22~0.45
粘着力	: 15~30MPa
内部摩擦角	: 57~61°

DH-6 孔の結果と同様、4 次多項式で近似した結果も図中に並記している。

図 5.1.5 に示す物理的性質に関しては、DH-6 と同様深度 400~700m 程度までとそれ以深で物性値の変化傾向が異なる。変化の傾向は若干異なり、深度 400~700m 程度の間は見かけ比重と空隙率が増加し、弾性波速度は減少する傾向を示す。深度 700m 以深では、空隙率は小さくなる傾向を示すが、弾性波速度と見かけ比重に有意な傾向は認められない。

力学的性質についても(図 5.1.6)、深度 400m~700m 程度までとそれ以深で物性値の変化傾向が異なる。深度 400m~700m の区間は弾性係数、ポアソン比、内部摩擦角が深度とともに増加し、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、粘着力が減少する傾向を示す。深度 700m 以深では、弾性係数が若干増加傾向にあるが、他の物性値はほとんど深度増加に伴う変化がないかあるいは測定結果のバラツキによって傾向が不明瞭になっている。

図 5.1.7 に各物性値間の相関性を検討した結果を示す。DH-6 とは異なり、相関係数が 0.5 以上のものは、弾性波速度とポアソン比の組み合わせのみであった。それ以外のいずれのパラメータの組み合わせでも相関性はほとんど認められない。

比熱については、深度 400~700m 間の物性値にバラツキが大きく傾向は不明瞭である。深度 700m 以深では、深度とともに増加する傾向を示す。熱伝導率、線膨張係数については、深度 800m 前後で不連続となる物性値分布を示している(図 5.1.8)。

帯磁率は、DH-6 と比較すると数倍以上大きな値を示すとともに、深度方向のバラツキが大きい。深度 500, 700, 800m 程度の地点では特に大きな値を示す(図 5.1.8)。

比抵抗については、深度 500~900m 程度の範囲で DH-6 孔の 2~3 倍程度の値を示す。岩種による違いは認められない(図 5.1.8)。

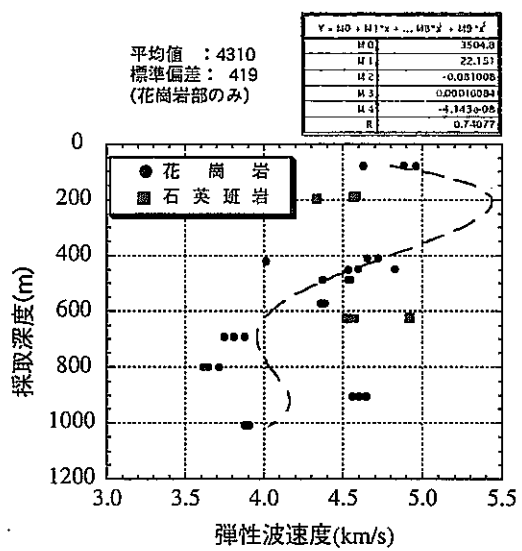
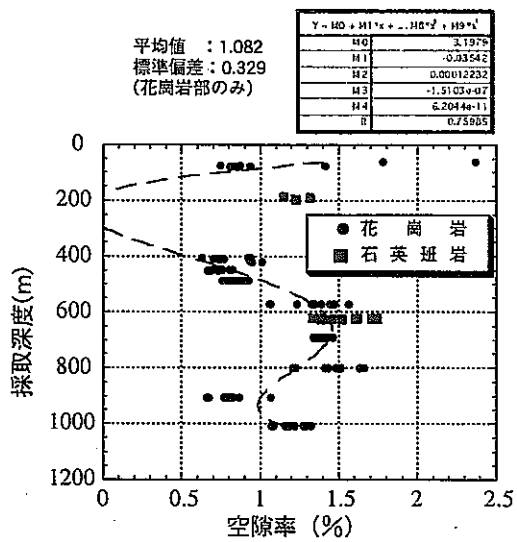
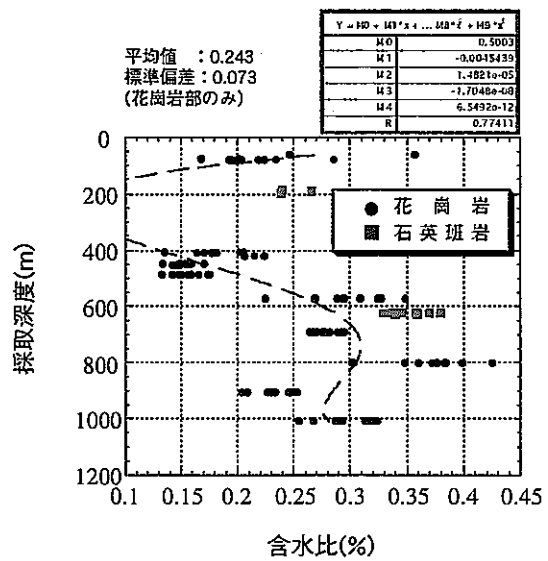
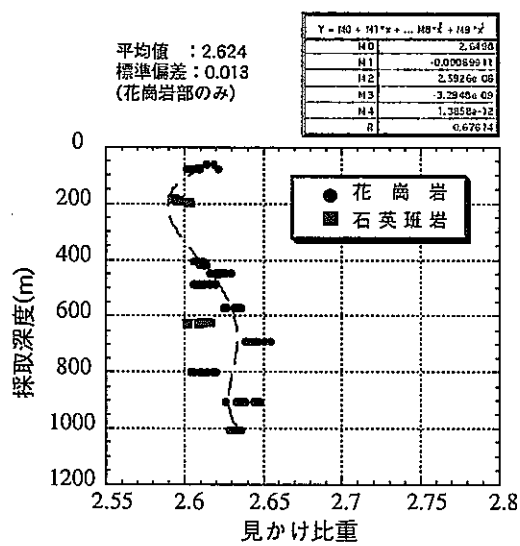


図 5.15 岩石コアの物理特性の深度変化(DH-7 孔)

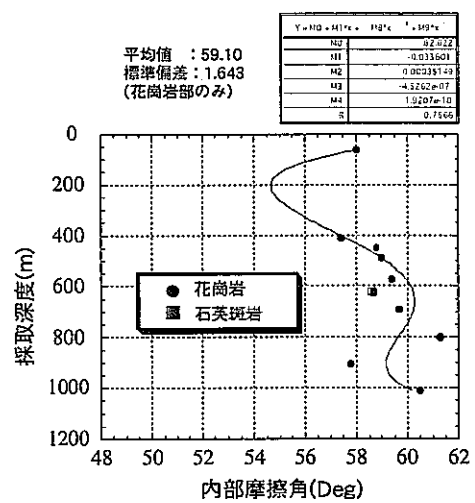
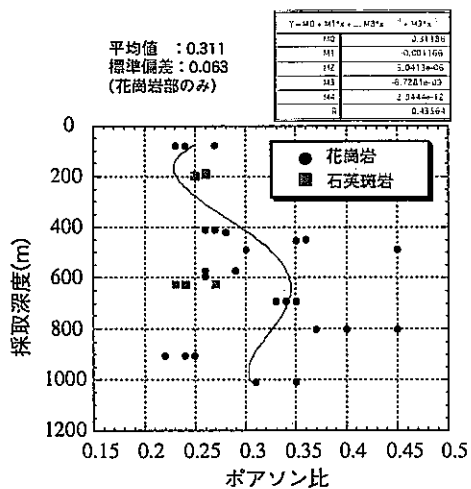
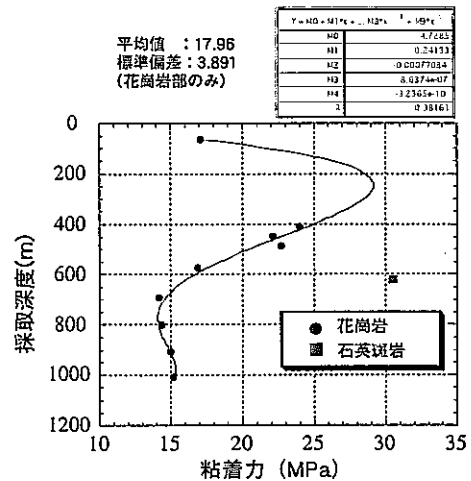
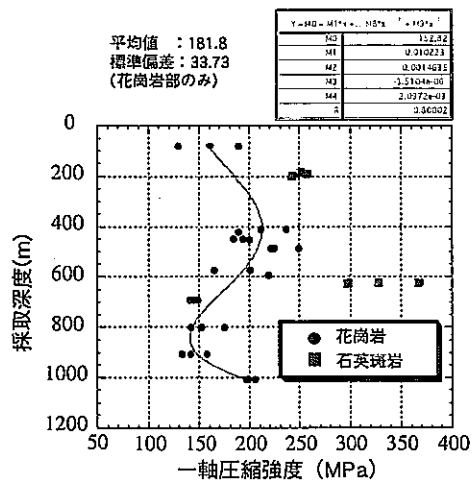
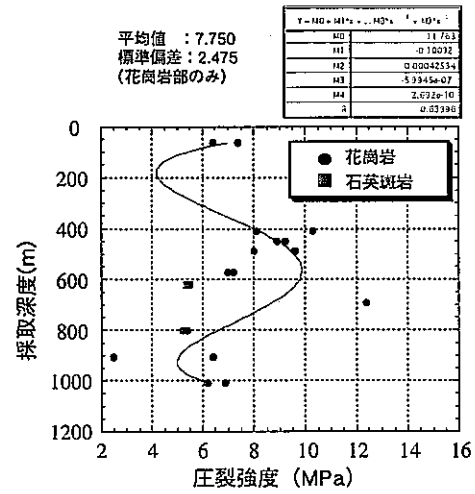
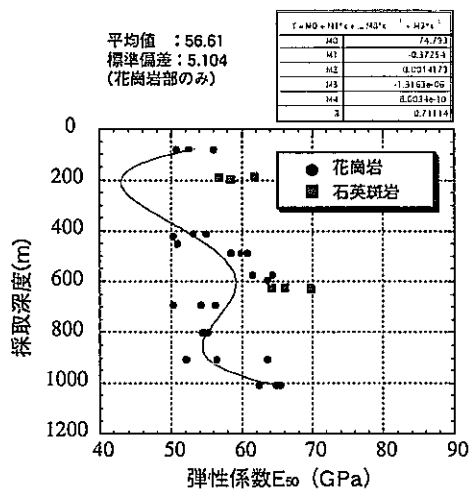


図 5.1.6 岩石コアの力学特性の深度変化(DH-7 孔)

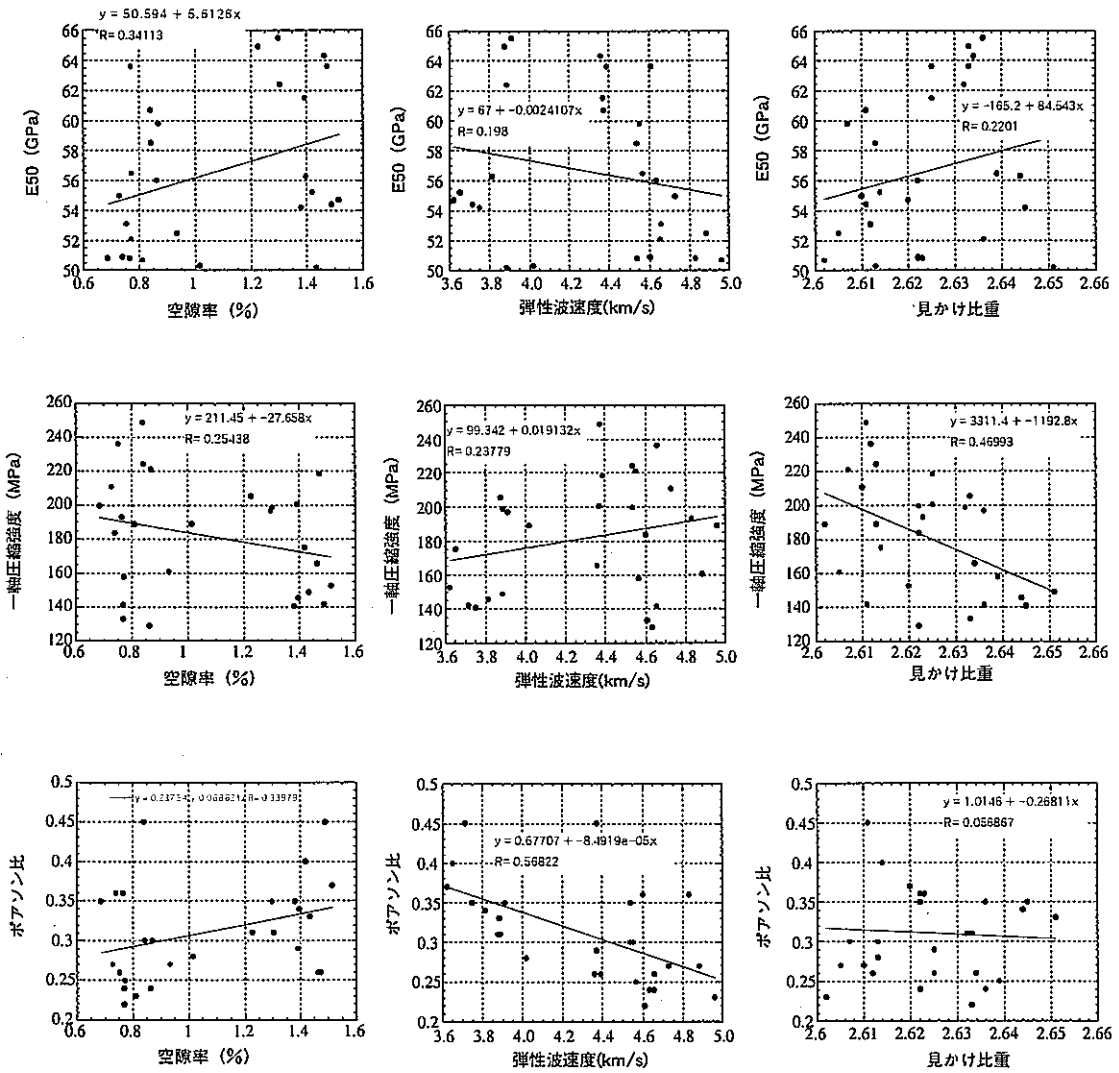


図 5.17 物理特性と力学特性の相関性(DH-7 孔)

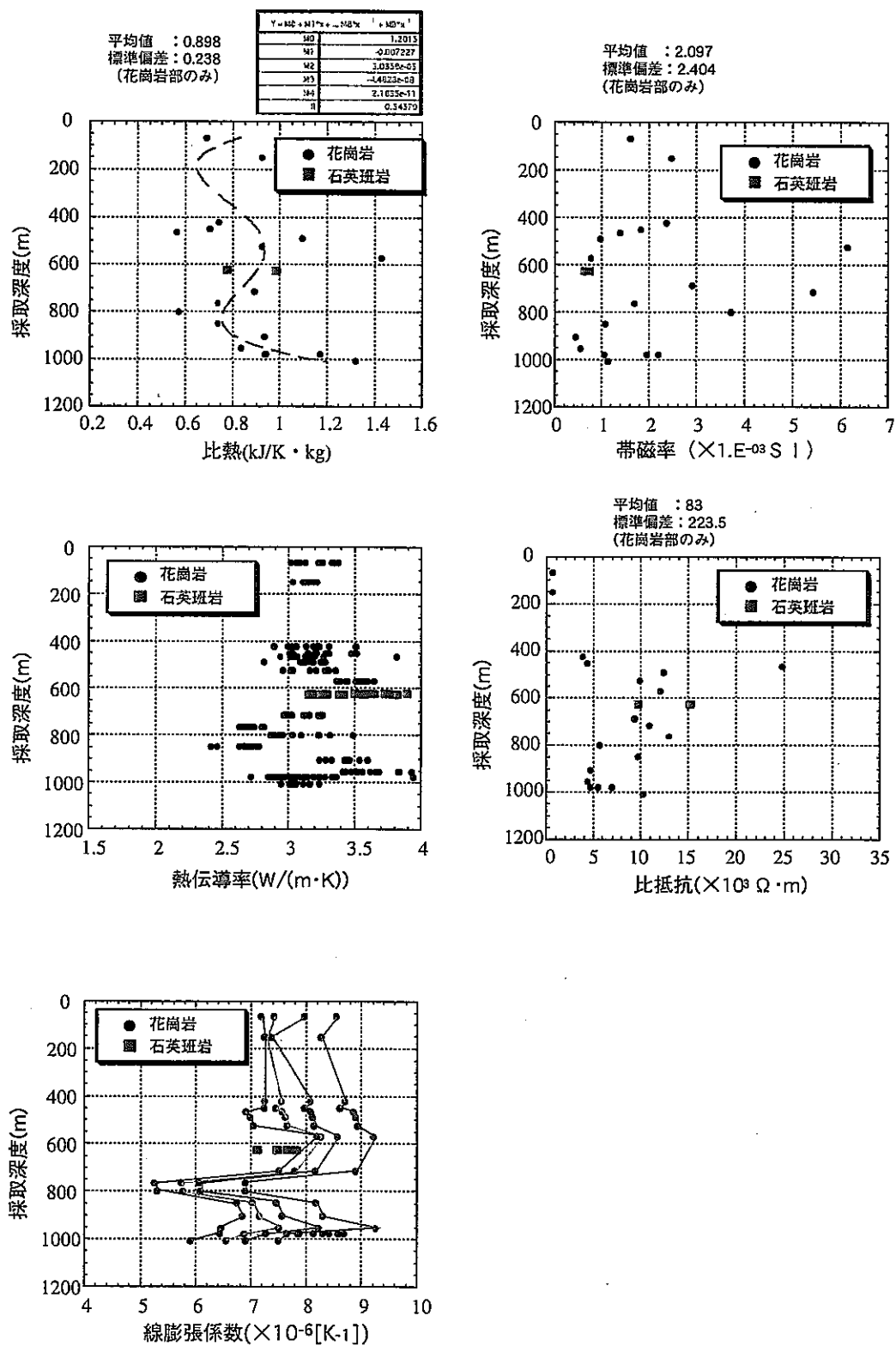


図 5.18 岩石コアの熱特性/帯磁率/比抵抗の深度変化 (DH-7 孔)

(3)DH-8号孔のコアを用いた室内力学試験結果⁴⁾

図 5.1.9~5.1.12 は、取得した各物性値と深度との関係を示したものである。DH-8 号孔においては、花崗岩のみを対象として室内試験を実施している。花崗岩の物性値は以下に示すような範囲に分布している。

見かけ比重	: 2.61~2.65
有効空隙率	: 0.4~1.3%
P波速度	: 3.7~5.0km/sec 程度
弾性係数(E_{50})	: 42~62GPa
一軸圧縮強度	: 120~190MPa
ポアソン比	: 0.22~0.40
粘着力	: 15~20MPa
内部摩擦角	: 53~59°

DH-8 号孔の測定結果は、最も測定値のバラツキが小さい。図 5.1.9 に示す物理的性質に関しては、深度 500m 付近と 800m 付近で物性値の分布傾向が変化している。深度 500m までは、見かけ比重についてはほとんど変わらず、空隙率が減少し弾性波速度は増加する傾向を示す。深度 500~800m までは、見かけ比重が微増し空隙率が増加するとともに、弾性波速度は減少する傾向を示す。800m 以深では、見かけ比重、空隙率はほとんど変化せず弾性波速度は増加する。

力学的な性質については、物性値によって変化の傾向が異なるように見える。弾性係数については、前述の物理的性質と同様、深度 500m、800m 以深で変化傾向は異なるように見える。弾性係数は、深度 500m までは増加し、500~800m までは減少傾向を示すが 800m 以深では再び増加に転じる。一軸圧縮強度については、深度 800m までは深度変化に伴う明瞭な変化はなく、深度 800m 以深で若干増加する傾向を示す。ポアソン比については、深度 600m 付近まで深度の増加とともに増加する傾向を示す。600m 以深では測定値のバラツキが相対的に大きく深度増加に伴う有意な変化は認められない。圧裂引張強度及び粘着力については、バラツキは大きいものの深度 800m 地点までは深度の増加に伴い減少する傾向を示し、それ以深では若干増加する。内部摩擦角についてはバラツキが大きく明瞭な傾向は認められない(図 5.1.10)。

図 5.1.11 に各物性値間の相関性を検討した結果を示す。DH-8 では、ここで検討した物理的性質と力学的性質のいずれのパラメータの組み合わせでも相関性は認められない。

熱特性については、比熱は深度変化とともに微増する傾向を示す。熱伝導率、線膨張係数については、深度 200m、400m、600m 及び 800m 付近を境に不連続な変化を示している(図 5.1.12)。

帯磁率については、DH-6, DH-7 孔よりも全般的に測定値のバラツキや値が大きい。また、深度 300m 程度までは値が減少し、深度 300~800m までは増加に転じ 800m 以深で再び減少するような傾向を示す。比抵抗については、深度 500m までは DH-6 孔の値とほぼ同じであるが、深度 500m 以深では深度に伴い増加する傾向を示している(図 5.1.12)。

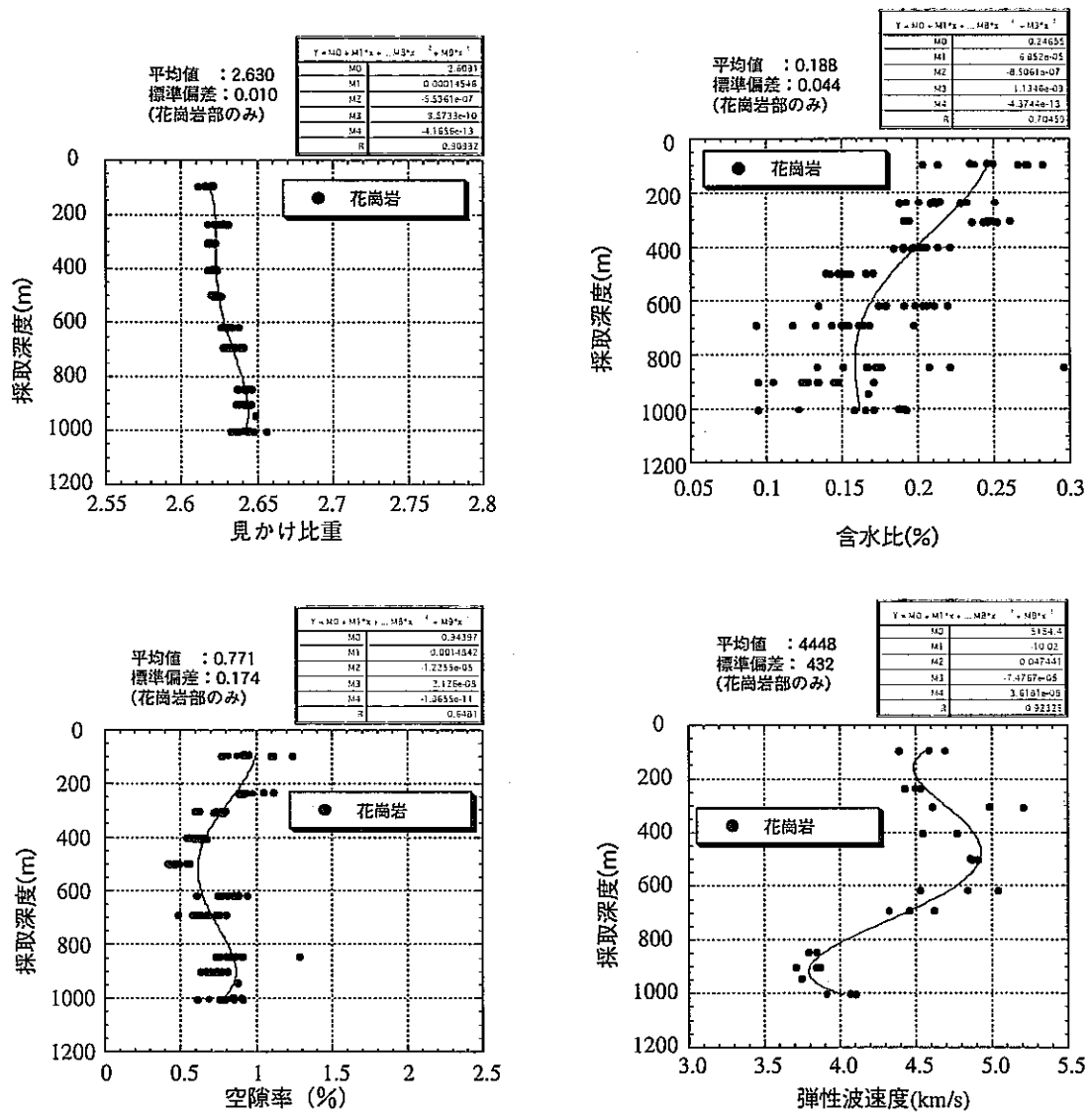


図 5.1.9 岩石コアの物理特性の深度変化(DH-8 孔)

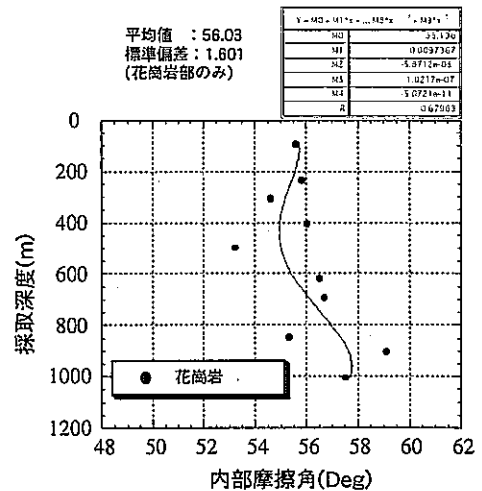
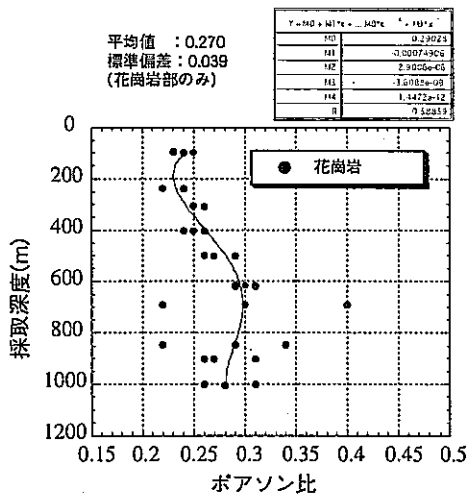
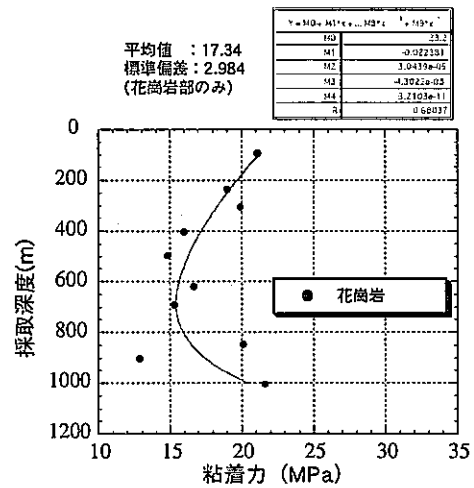
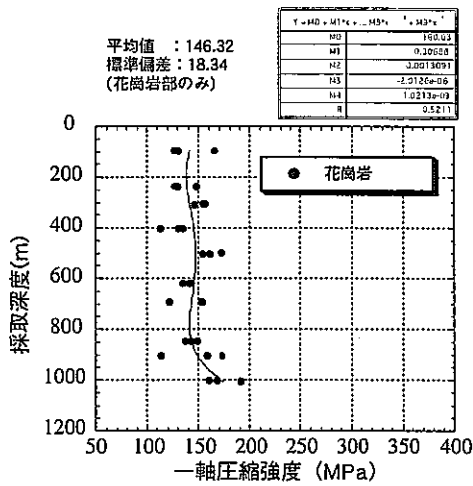
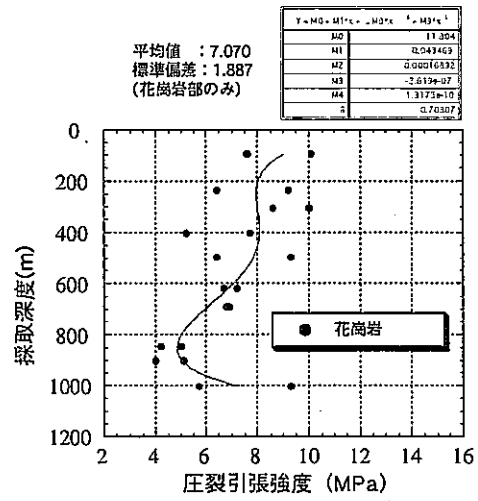
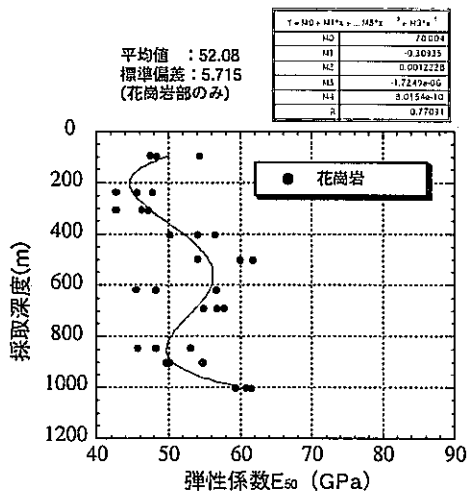


図 5.1.10 岩石コアの力学特性の深度変化(DH-8 孔)

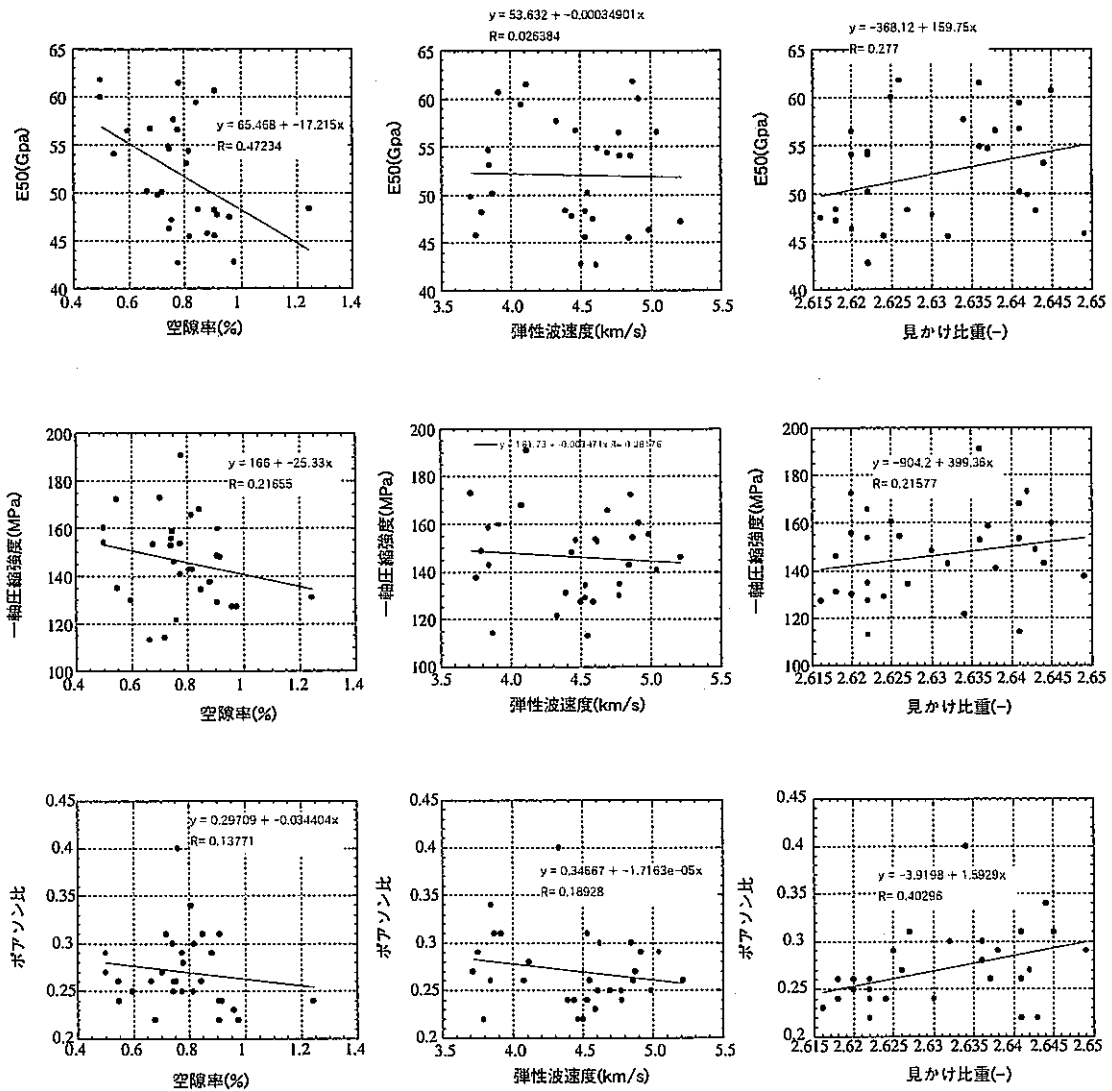


図 5.1.11 物理特性と力学特性の相関性(DH-7 孔)

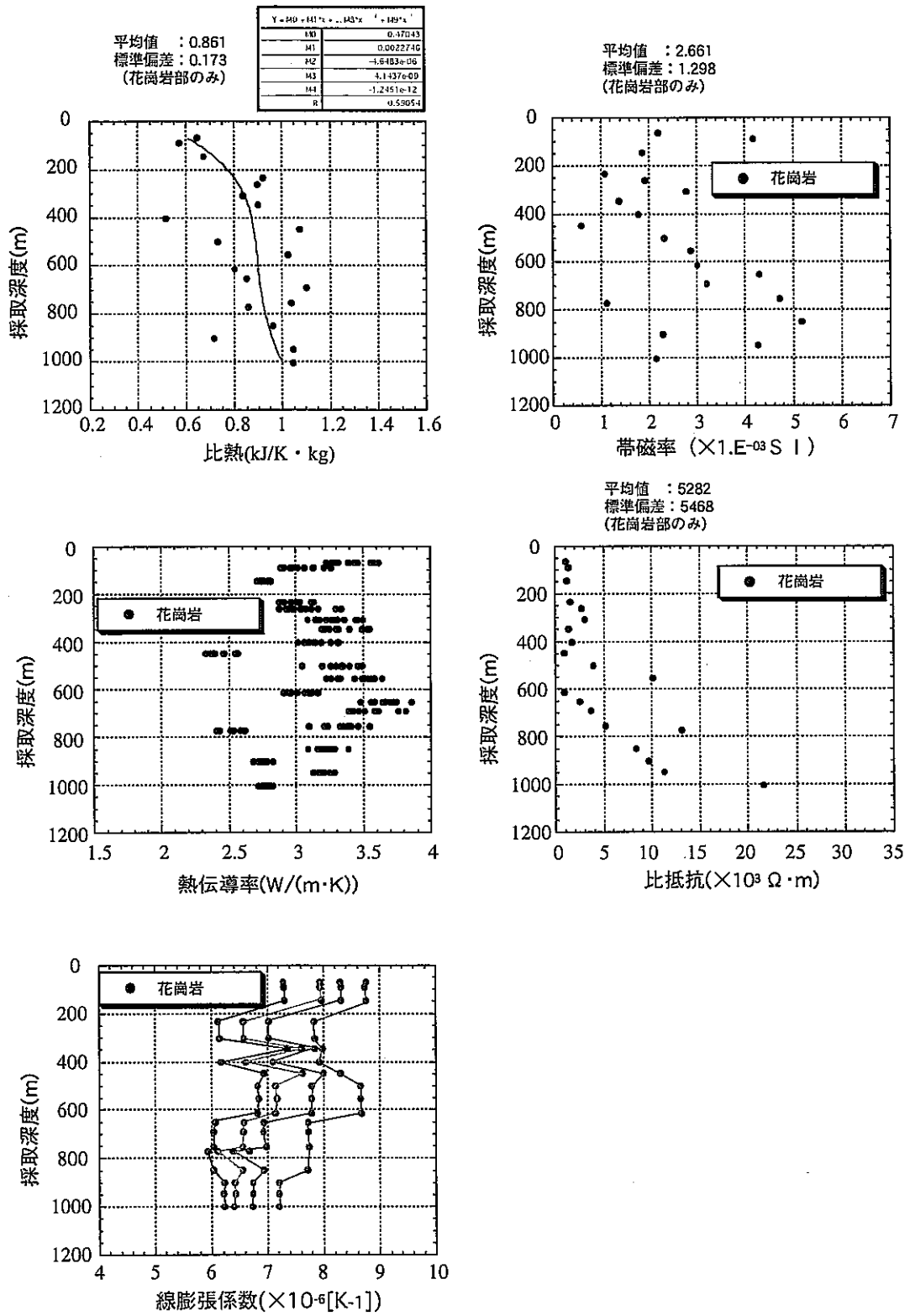


図 5.1.12 岩石コアの熱特性/帯磁率/比抵抗の深度変化 (DH-8 孔)

5.2 初期応力測定結果

DH-6, 7, 8 孔では、応力測定用のコアを用いた物理試験及び AE/DRA 法による鉛直応力測定を実施した。図 5.2.1 に物理試験結果を、図 5.2.2 に AE 法及び DRA 法から算定された深度方向の応力分布を示す。AE/DRA 法による測定は、カイザー効果の時間依存性⁵⁾を考慮し、コア採取後 2～3 日以内に測定を終了するよう配慮した。

応力測定用のコアで計測された見かけ比重並びに弾性波速度の変化傾向は先の物性試験の変化と同様深度 700m 付近で異なっている。特に、弾性波速度については、いずれの孔についても、深度 700m 程度までは減少傾向を示しそれ以深で再び増加傾向に転じる。

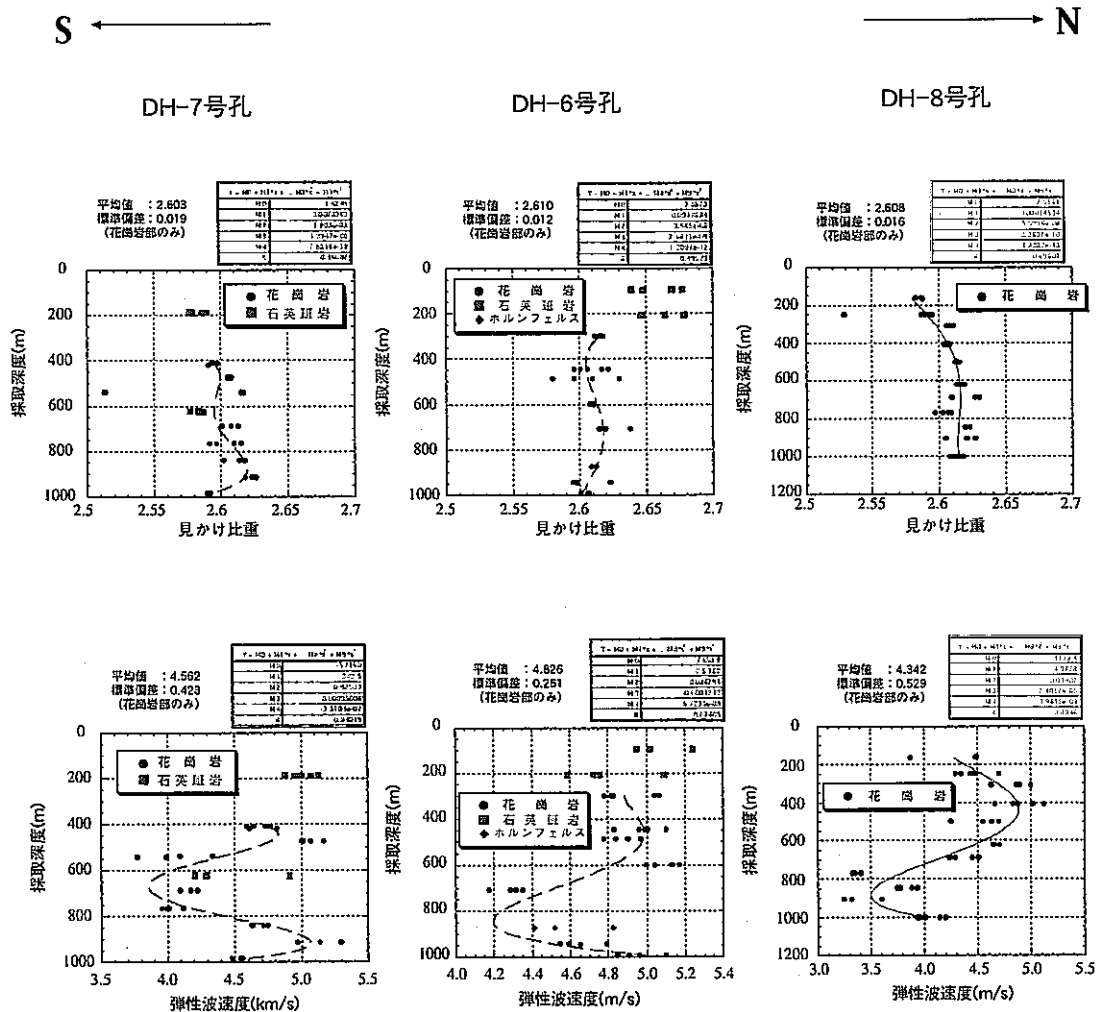


図 5.2.1 応力測定用岩石コアの物理物性の深度分布(DH-6,7,8 孔)

応力値の算定では、AE 法では AE 発生量が急増する点を応力値とし、DRA 法では 5 回の繰り返し載荷を行い、1～5 回目の繰り返し時の応力～ひずみ曲線の組み合わせを用いて、差ひずみを算出し、応力値が評価可能なもの、すなわち極大点が得られる組み合わせから最終的な応力値を決定した。

なお、本測定では、AE 法・DRA 法とも測定結果のバラツキが大きい箇所や両方の一方の測定において応力値の決定が不可能な場合があった。このため、図 5.2.2 は、便宜的に AE 法と DRA 法で決定された応力値の平均値の深度分布を示している。

DH-6,7,8 孔の測定結果では、局部的にバラツキが大きい箇所が見られるが、この点については考察の部分で後述する。鉛直方向の応力値が地表面で 0 となる直線で表されると仮定すると、それぞれの鉛直応力 σ_v と深度 Z の関係は以下の式で表される。

$$\text{DH-6} : \sigma_v(\text{MPa}) = 0.0251 \times Z(\text{m})$$

$$\text{DH-7} : \sigma_v(\text{MPa}) = 0.0266 \times Z(\text{m})$$

$$\text{DH-8} : \sigma_v(\text{MPa}) = 0.0248 \times Z(\text{m})$$

上記の関係を見ると、深度勾配は DH-7>DH-6>DH-8 の順になっており、南から北に向かうにつれ、鉛直応力の深度勾配が小さくなる傾向にある。

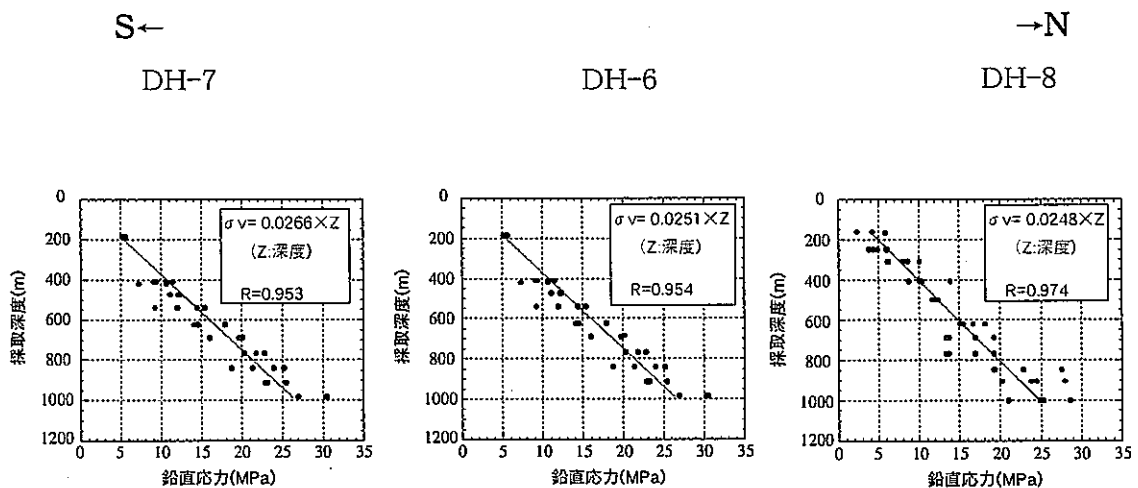


図 5.2.2 AE 法及び DRA 法により算定された鉛直方向の初期応力 (DH-6,7,8 孔)

6. 考察

DH-6,7,8 号孔で得られた室内力学試験結果及び応力測定結果を、以下の観点から考察する。

6.1 土岐花崗岩の物理的・力学的特性

1) 岩石の力学特性

表 6.1.1 に DH-6, 7, 8 号孔の室内物理力学試験結果を示す。また、参考として超深地層研究所建設予定地点(図 3.1 参照)に同じ花崗岩体中に掘削した MIU-1, AN-1 号孔における室内物理力学試験結果も合わせて表示している(表中の網掛け部分)。なお、表 6.1.1 中に示した物性値はすべて土岐花崗岩を対象として実施した試験結果のみである。

表 6.1.1 DH-6, 7, 8 孔及び AN-1, MIU-1 孔における室内試験結果一覧 (平均物性)

		DH-6	DH-7	DH-8	MIU-1	AN-1
物理的性質						
見かけ比重	平均値	2.631	2.624	2.63	2.621	2.605
	標準偏差	0.013	0.013	0.01	0.011	0.009
有効空隙率 (%)	平均値	0.936	1.082	0.771	1.328	1.404
	標準偏差	0.445	0.329	0.174	0.25	0.263
含水比	平均値	0.22	0.243	0.188	0.444	0.233
	標準偏差	0.094	0.073	0.073	0.084	0.047
弾性波速度(P波) (km/sec)	平均値	4.414	4.31	4.448	5.476	4.511
	標準偏差	1.077	0.419	0.432	0.274	0.373
力学的性質						
弾性係数(E_{50}) (GPa)	平均値	54.54	56.61	52.08	55.95	47.276
	標準偏差	4.546	5.104	5.715	5.941	8.048
一軸圧縮強度 (MPa)	平均値	152.2	181.8	146.32	180.11	197.16
	標準偏差	17.8	33.73	18.34	38.297	44.7
ポアソン比	平均値	0.288	0.311	0.27	0.32	0.335
	標準偏差	0.03	0.063	0.039	0.04	0.03
圧裂引張強度 (MPa)	平均値	7.043	7.75	7.07	7.18	8.472
	標準偏差	1.903	2.475	1.887	1.825	1.818
粘着力 (MPa)	平均値	18.06	17.96	17.34	39.04	-
	標準偏差	4.022	3.891	2.984	8.914	-
内部摩擦角 (°)	平均値	56.34	59.1	56.03	52.596	-
	標準偏差	2.198	1.643	1.601	4.582	-

表 6.1.1 から、DH-6, 7, 8 孔に共通することは、南側から北側に行くにつれ、若干ではあるが平均物性値が変化していることである。この傾向は、AN-1, MIU-1 孔でも認めら

れている。具体的には、平均的な物理的物性については、南側から北側に向かうにつれて有効空隙率は小さくなり弾性波速度は早くなる。平均的な力学的性質については南側から北側に向かうにつれて弾性係数、一軸圧縮強度、ポアソン比、圧裂引張強度とも小さくなっている。月吉断層の上盤側と下盤側という視点で比較した場合は、断層上盤側に位置する AN-1 孔, MIU-1 孔において下盤側に位置する DH-6~8 孔よりも有効空隙率が大きく、見かけ比重が小さくなっている。

次に個別の平均物性値に関して比較・検討する。力学的性質のうち、平均弾性係数は AN-1 孔を除けばほぼ同等である。一軸圧縮強度については、DH-6 と DH-8 孔の値が他孔に比較して 20%程度小さくなっている。平均ポアソン比についても、DH-6, 8 孔の値が低い。しかし、バラツキの範囲を考慮すると、弾性係数とポアソン比はすべての孔で同程度の値を示すものと考えられる。一軸圧縮強度については DH-6, 8 孔の結果が下限、AN-1 孔の結果が上限のような値を示している。圧裂引張強度は、AN-1 孔の値が若干高い(10%程度)が大きな差ではない。粘着力は、MIU-1 号孔が最も大きく、内部摩擦角は逆に小さいが、他の 4 孔についてはほぼ同等である。物理的性質については、AN-1 号孔の見かけ比重が小さい。有効空隙率は DH-6 ~ 8 孔の値が MIU-1, AN-1 号孔の値よりも小さくなっている。弾性波速度及び含水比については、MIU-1 号孔の値が最も大きい。

以上の検討結果から、土岐花崗岩の力学特性のうち少なくとも変形性に関わるパラメータ（弾性係数、ポアソン比）は、平均値として見ると花崗岩体内部で大きく異ならないと判断される。強度特性については、一軸圧縮強度が岩体内部で大きくばらつく可能性があることが推定される。物理的性質に関しては、MIU-1, AN-1 号孔が DH-6 ~ 8 孔にくらべ見かけ比重が小さく、有効空隙率が大きく、弾性波速度も速い。ちなみに、釜石原位置試験で対象とした栗橋花崗閃緑岩と比較すると、土岐花崗岩は、一軸圧縮強度は同等もしくはそれ以上にもかかわらず、有効空隙率は 2 倍程度大きく、弾性波速度（P 波）は MIU-1 孔以外は約 1km/sec 程度遅い。これは、土岐花崗岩の物理的・力学的特性が栗橋花崗閃緑岩と比較して相対的に大きな異方性を有することを示唆していると考えられる。これらの結果を力学的なモデル化の観点から検討すると、土岐花崗岩体を一つの均質な物体としてモデル化する場合は、岩石マトリックス部の変形パラメータ（弾性係数、ポアソン比）は一つの平均物性値で代表できる可能性があること、異方性に関する情報が必要なこと、岩石強度の設定に関しては対象領域が決定された後にその近傍から取得されたデータを用いて行うことが肝要であることを示していると思われる。

図 6.1.1, 6.1.2 に DH-6~8 孔の物理試験結果と力学試験結果をまとめて示す。また、参考として、図中には AN-1, MIU-1 孔の同種の試験結果を並記している。超深地層研究

所建設地点の試錐孔が南北方向に配置されているため、DH-6 ~ 8 孔の試験結果についても南北断面で整理している。

物性値の深度分布は、すべての孔で変化しておりかつ変化の傾向は一定ではない。物性値の変化傾向が変わる深度は、DH-6 ~ 8 号孔については、深度 400~500m, 700~800m 地点であり、AN-1, MIU-1 号孔では深度 300m, 700m 地点であり、類似性があるように思われる。しかし、その変化傾向自体は、すべての孔で同一ではない。

図 6.1.3 には、含水比と力学物性値間の相関をとったものを示す。6 章の図に示したように、DH-6~8 孔については、一般に言われるような物理特性と力学特性との相関が DH-6 孔を除きほとんど認められなかった。しかし、図 6.1.3 を見ると含水比と力学物性値との相関性は、DH-6 ~ 8 孔のいずれにおいても、他の物理特性をパラメータにした場合に比して相対的に高い。

図 6.1.4 には、評価に用いている E_{50} の他、応力~ひずみ線図において無載荷状態に近い応力レベルで求められた接線弾性係数(E_0)と原点と一軸破壊強度点を結ぶ割線弾性係数(E_s)の関係と物理物性のうち弾性波速度の測定結果を示している。同図から、弾性波速度の深度変化と E_0 の深度変化の間には良好な相関性が認められること、ある深度レベルまでは E_0 の値が E_{50} よりも大きくなっていることが読みとれる。 E_0 は試験前に供試体内に含まれるマイクロクラックの影響を最も反映したパラメータであることから、弾性波速度が岩石供試体内部のマイクロクラックの影響により変化している可能性が高いことがわかる。岩石の熱特性についてもマイクロクラックの影響が指摘されている^{6),7),8),9)}。

以上の結果は、マイクロクラックやマイクロクラック中の水分が力学試験結果に顕著な影響を与えていることを示唆するものと考えられるが、供試体に含まれるマイクロクラックが原位置において存在したものだけか否かが不明であるため、その点は今後 DSCA 法等の試験を実施し確認する必要がある。

以上の考察をまとめると、基本的には土岐花崗岩体内の物理的・力学的諸特性は、岩石マトリックス部でさえ少なくとも深度方向には不均一であると想定することが妥当であると考えられる。ただし、土岐花崗岩体のマトリックス部の平均的な変形特性（弾性係数、ポアソン比）については、あるばらつきの範囲内で岩体としての物性を評価することができる可能性がある。このような物理的性質や強度特性の差異あるいは物性値の変化傾向の違い、各物性値間の相関性については、岩石の鉱物組成や前述した岩石コア中のマイクロクラックの分布特性が影響している可能性があるため、鉱物分析や DSCA 法などによる室内試験を実施し、それらの結果との比較を行う必要があると考えられる。

S ← → N

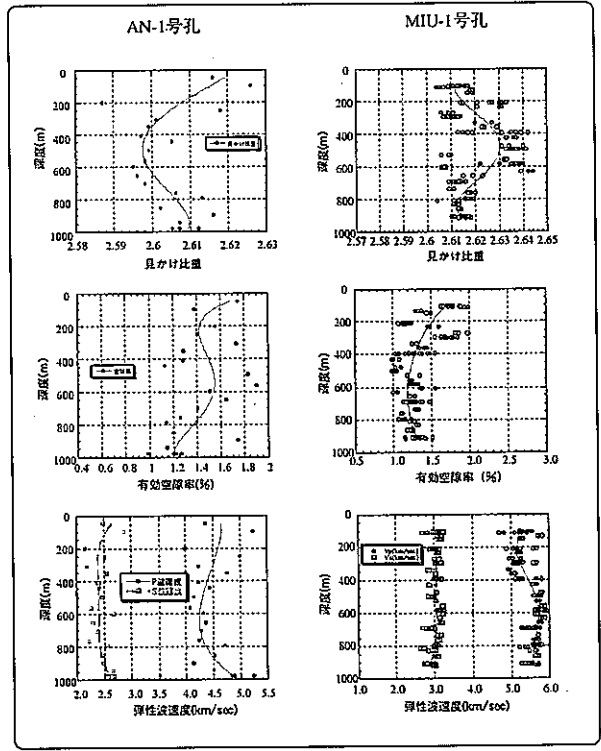
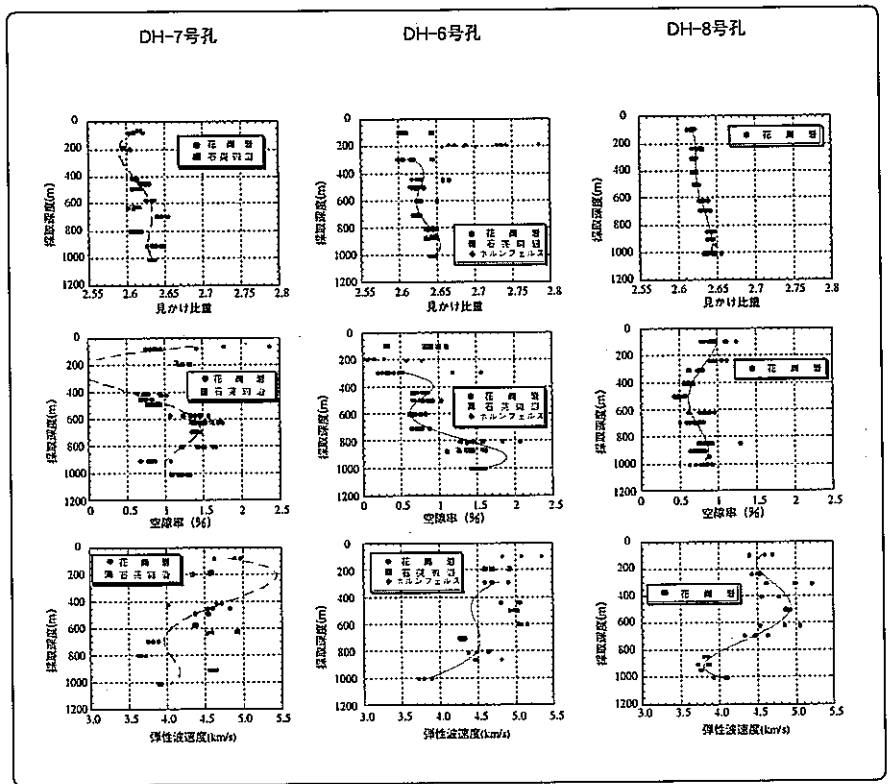


図-6.1.1 岩石の物理的性質の比較(DH-6, 7, 8 孔及び AN-1, MIU-1 孔)

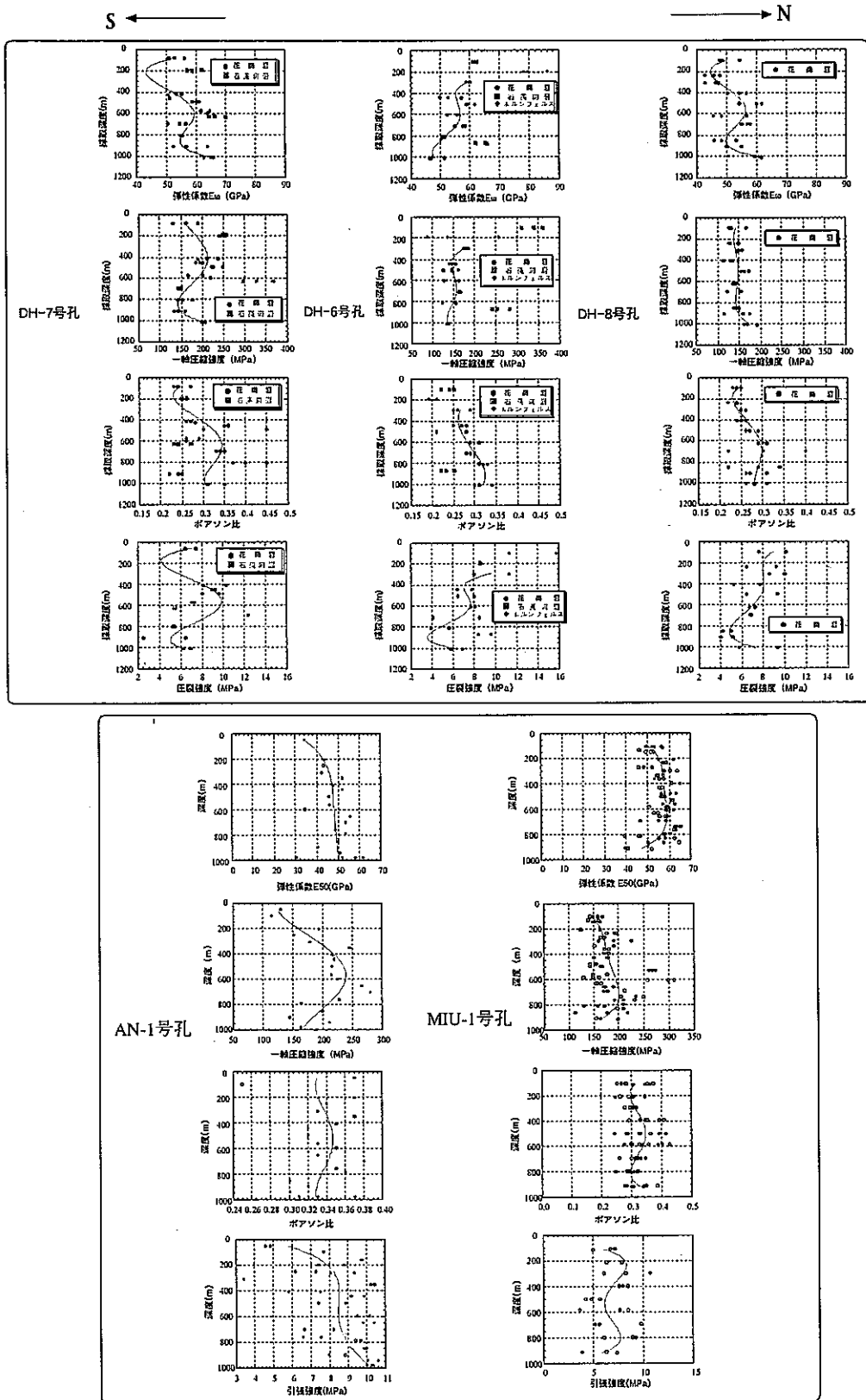


図-6.1.2 岩石の力学的性質の比較(DH-6, 7, 8 孔及び AN-1, MIU-1 孔)

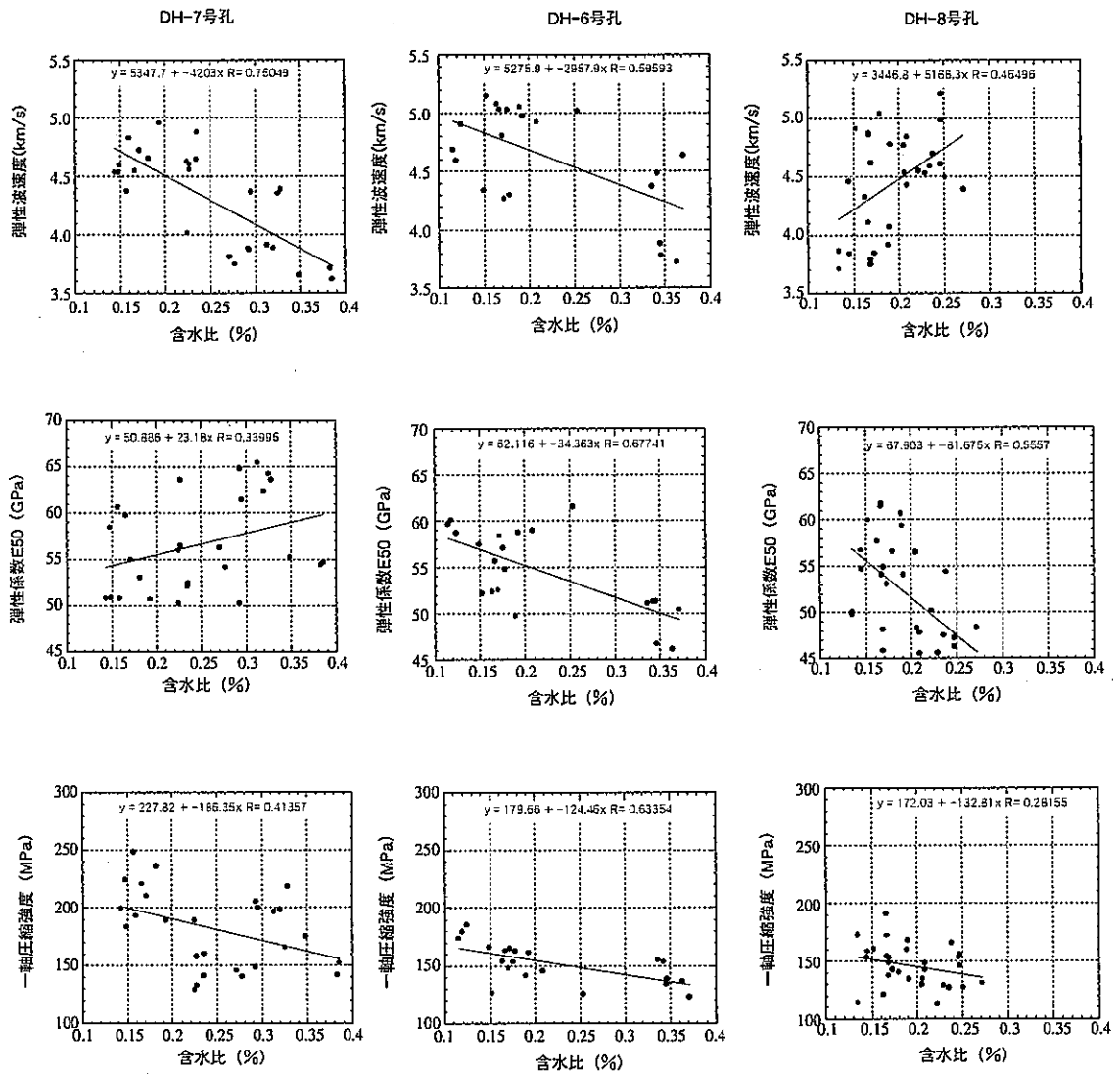


図-6.1.3 含水比と力学特性との相関性(DH-6 ~ 8)

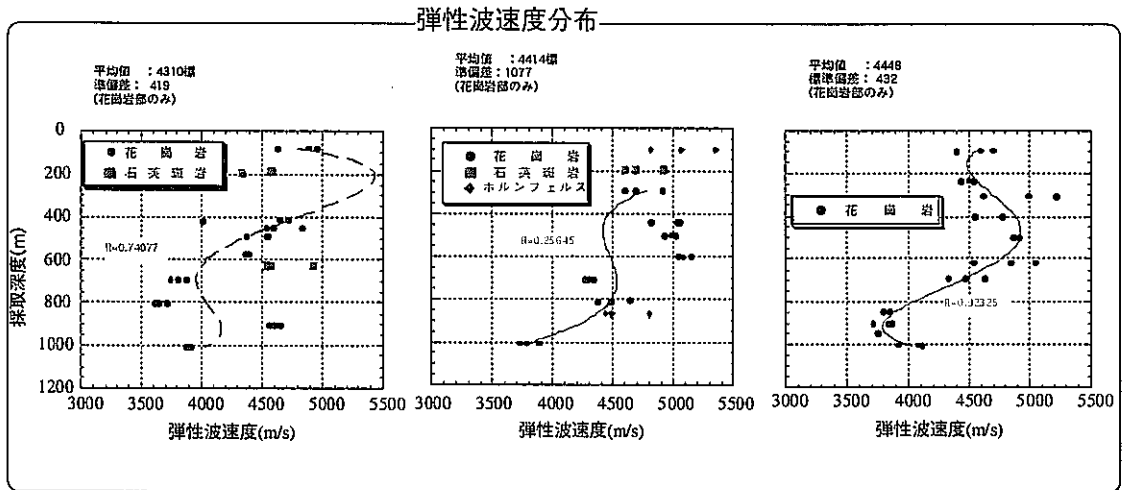
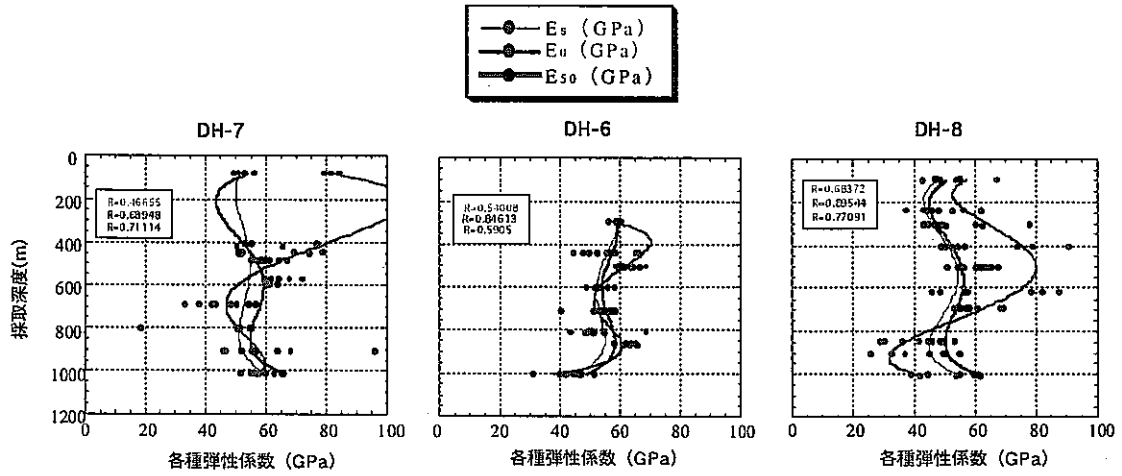


図-6.1.4 E_0, E_s 及び E_{50} の深度変化と弾性波速度分布との比較

2)土岐花崗岩体中の初期応力状態

図 6.1.5 は、DH-6 ~ 8 孔において AE 法と DRA 法によって求められた応力値を個別に表示したものである。先の物性値と同様の理由により、南北断面で整理している。また、参考として MIU-1 号孔において実施された AE 法、DRA 法による測定結果も併せて同図に示す。

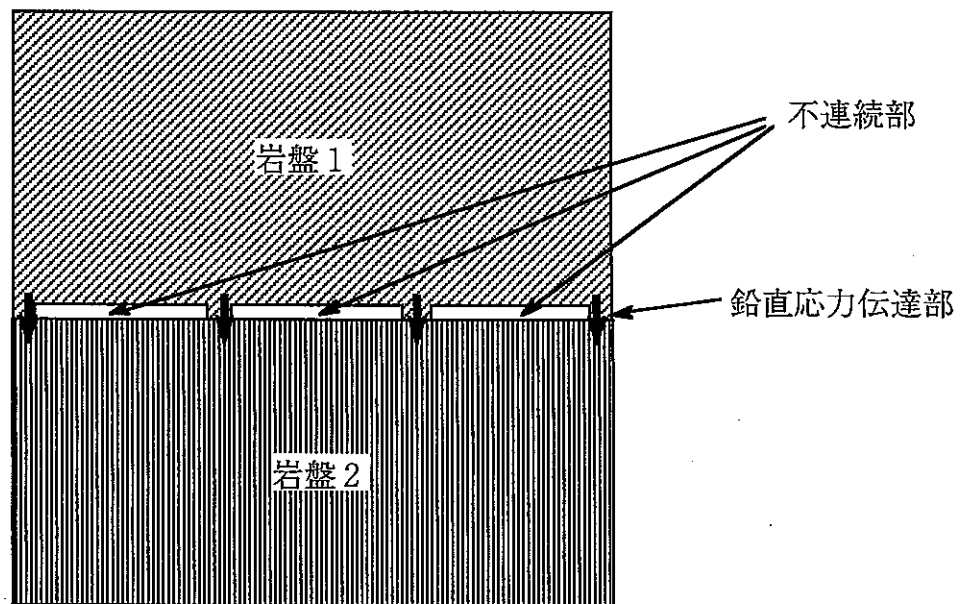
MIU-1 号孔の測定結果と比較すると、DH-6~8 号孔の測定結果は、AE 法の結果のバラツキが大きくなっており、DRA 法は逆にバラツキが小さくなっている。釜石原位置試験において、測定システムや使用する AE センサーの共振周波数の違いが測定結果に及ぼす影響を検討した⁴⁾が、その結果ではこれらの違いは測定結果にほとんど影響を及ぼさないことが確認されている。しかし、MIU-1 号孔と DH 孔で実施した AE 法による測定では、AE センサーが供試体に直接取り付けられているか否かという点が大きく異なる。特に、DH-6 ~ 8 孔における AE 法による測定では、AE センサーが供試体中央部に直接張り付けられているのではなく、供試体上下端面に接触するスペンサー部に内臓されているため供試体端面の微小クラッキング等が計測結果に影響を与えた可能性がある。DRA 法の測定結果のバラツキが小さくなっている理由は、MIU-1 孔の測定に比べ DH 孔の測定ではひずみ測定の感度を上げているためと考えられる。

以上の検討から、DH 孔においては AE 法の測定結果の信頼性が MIU-1 孔と比較すると低くなっていると判断される。しかし、DH-6 ~ 8 孔の測定は全て同じ方法で実施しており、相対的な比較は可能であると判断し以降の考察を行う。

図 6.1.5 を詳細に見ると、AE/DRA 法いずれの測定においても原点を通る近似直線から大きくはずれるかあるいはバラツキが大きい所がある。近似直線は、深度と鉛直方向応力成分の大きさとの関係を示しているが、このバラツキが大きい部分の深度は、6 章の 1)で述べた物性値の深度変化傾向が変わる深度とほぼ対応している。図に示す MIU-1 の AE 法による測定結果と物性値分布との関係もこれと同様である。カイザー効果の時間依存性については考慮して試験を実施しているため、AE 法、DRA 法とも時間経過による様々な影響は無視できる。

上記の理由については、現状では 2 つの可能性が考えられる。一つは、測定結果が正しいと仮定すれば、超深地層研究所建設予定地点では水平面内応力分布について Stress decoupling を示しているという結果が得られていることから考えて、土岐花崗岩体中に水平方向に広がる不連続構造が存在し、その不連続構造部で見かけ上鉛直方向の応力が解放されているような様相を呈している可能性である。ただし、不連続点前後の測定結果は、推定土被り圧のラインとほぼ一致するため、完全に鉛直方向の応力伝達が途切れているわ

けではない。このような状態を呈する可能性のある岩体構造を概念的に示すと下図のような状態が想定される。



もう一つは、掘削自体や掘削時の応力解放に伴い、岩石コアがミクロなダメージを受け、測定された応力が見かけ上過小評価された可能性である。この場合は、有効空隙率といったパラメータにその影響が反映されると思われるが、応力値の不連続部で必ずしも有効空隙率が大きくなっているわけではないため、この可能性は少ないと考えられる。いずれにしても、上記の主要因を特定するためには、岩体内部における不連続構造の水平方向の広がりを詳細に検討する必要があると考えられる。

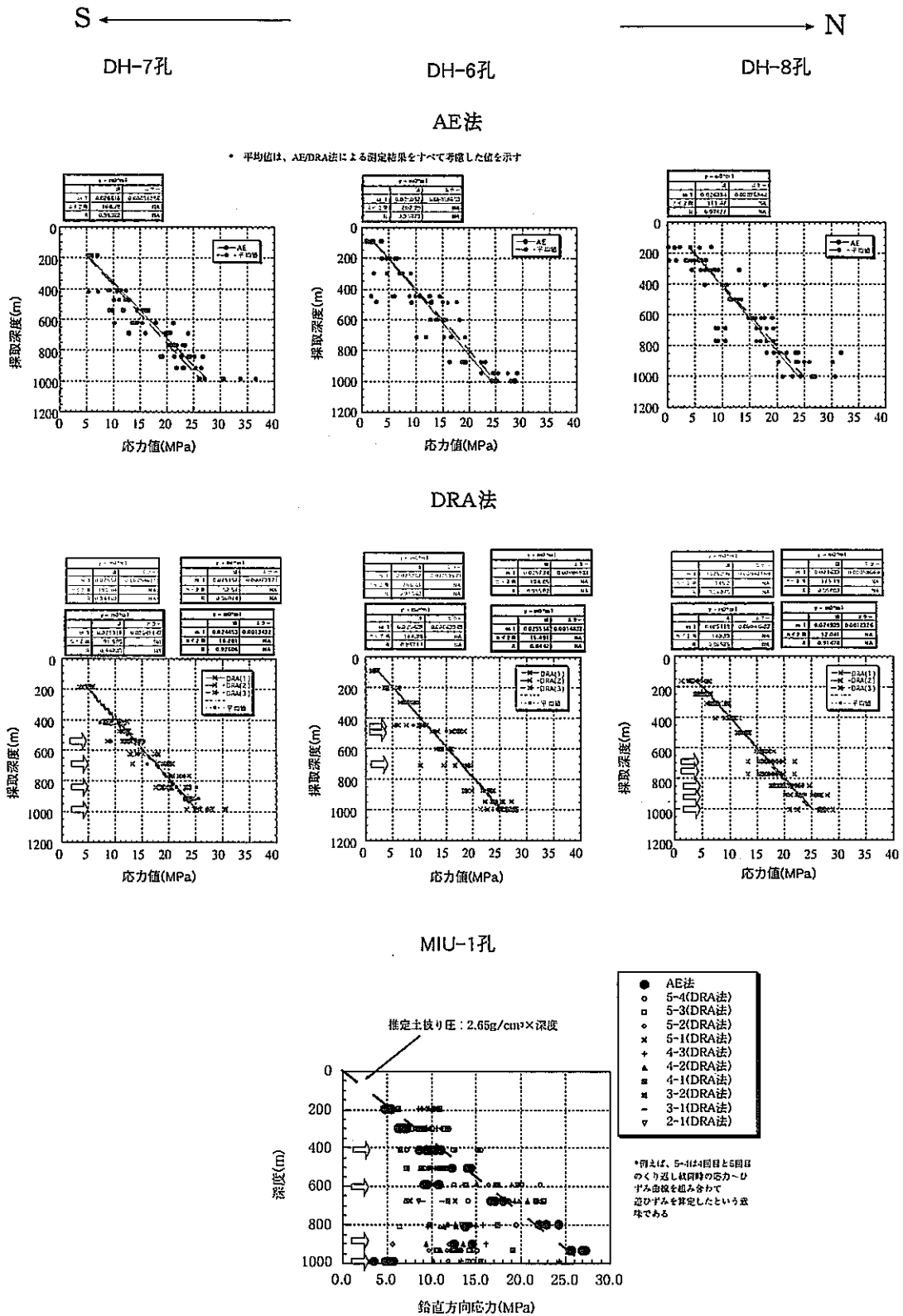


図-6.1.5 DH-6～8孔及びMIU-1孔における鉛直応力測定結果の比較
 ((⇒は、平均応力値が推定土被り圧や深度勾配から外れるもしくは結果のバラツキが大きい箇所を示す))

6.2 地質構造と岩盤物性値及び応力状態との関係について

図 6.2.1 に DH-6 ~ 8 孔で実施した BTV 観察結果に基づく割れ目数の深度変化とその方向性の深度変化を示す。また、参考として、AN-1 孔と MIU-1 孔で得られた同種の測定結果を同図に示す。DH-7 孔では、孔壁崩壊等の影響により深度 400m まではケーシングを挿入したため、データが取得できていない。

DH-6,7 孔においては、AN-1 孔及び MIU-1 孔と同様深度方向に割れ目数の増減が認められる。割れ目数が少ない部分(50m あたり 100 本以下)は、DH-6 孔では深度 400~700m 程度の区間であり、DH-7 孔は深度 550 ~ 800m 程度の領域で若干深くなっている。割れ目の方向性についても大きく違わないことから、DH-6, 7 孔の割れ目数の少ない区間は連続している可能性があると考えられる。一方、DH-8 孔では深度 200m までと、深度 350~450m 及び深度 900 ~ 1000m の地点に割れ目数の少ないゾーンがあるが、DH-6,7 孔のそれと割れ目の方向性に大きな違いがみられる。このため、DH-6, 7 孔のそれと直接的に連続しているとは現状では言えない。

DH-6, 7 孔の割れ目頻度の増減と物性分布は、AN-1, MIU-1 孔での測定結果と同様ほぼ対応した形である。これは、岩石の微視的構造とともに岩体の不連続面の分布特性も岩石コアの深度方向の物性変化や応力分布に影響を与えていることを示唆するものと考えられる。

図 6.2.2 に DH-6 ~ 8 孔の地質柱状図と割れ目分布の比較結果を示す。これを見ると、DH-6 ~ 8 孔には細粒~粗粒までの花崗岩が分布するものの、その深度方向の配列は各孔ともほぼ同じ構成であり、地質的には水平方向に同じような岩相が連続していることが推定される。これは、6.1 で述べた南北方向の岩石物性の変化や深度方向の岩石物性変化傾向の違いあるいは深度方向の割れ目分布特性の違いが岩相変化からは説明できないことを意味している。解釈のためには、より詳細な鉱物分析結果等との比較が必要と考えられる。

以上の考察から、土岐花崗岩においては、物性値の深度方向の変化や割れ目分布と岩相の違いにほとんど相関関係がないと考えられる。言い換えれば、現状では物性値分布や割れ目分布の違いは、地質学的な岩相分布の違いよりもむしろ広域的な応力状態の変化等の力学的要因によってもたらされている可能性が高いと推定される。

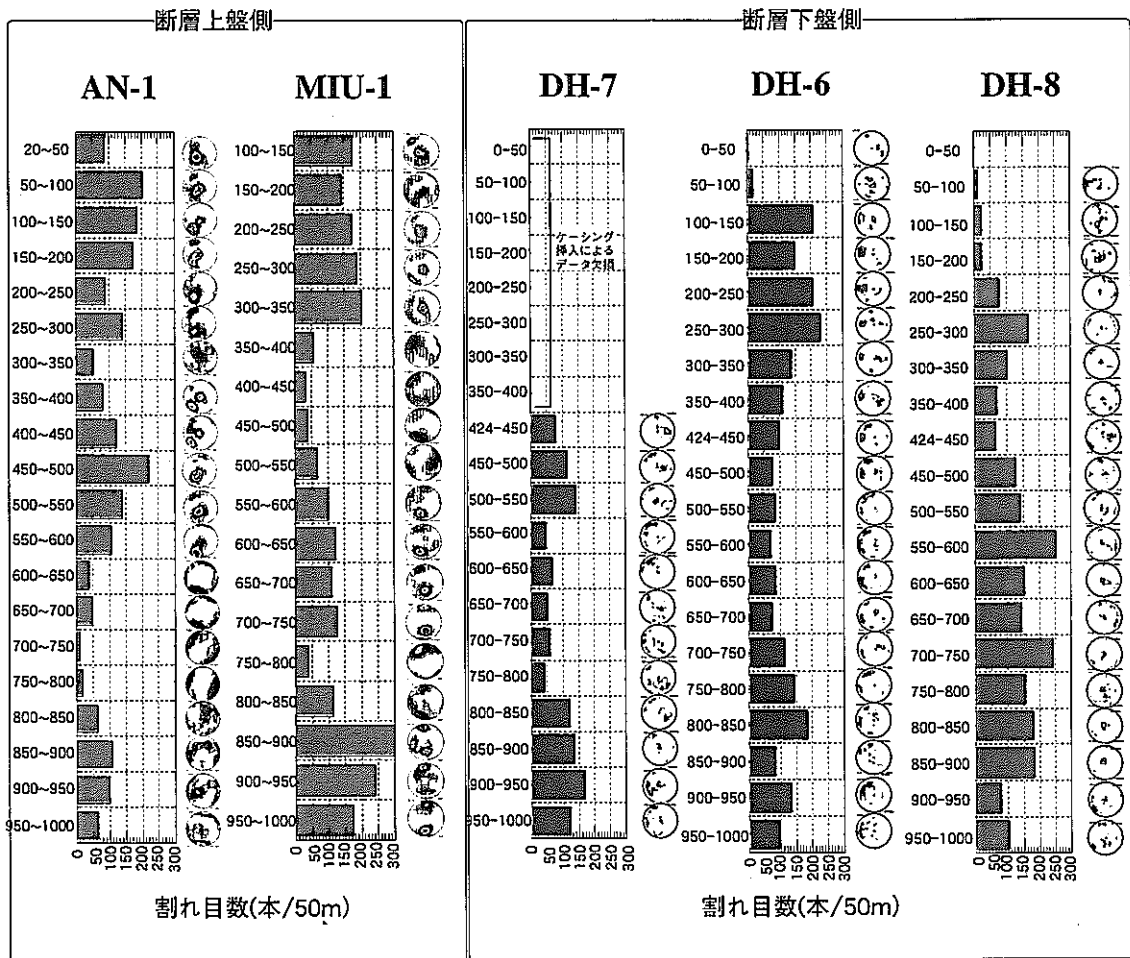
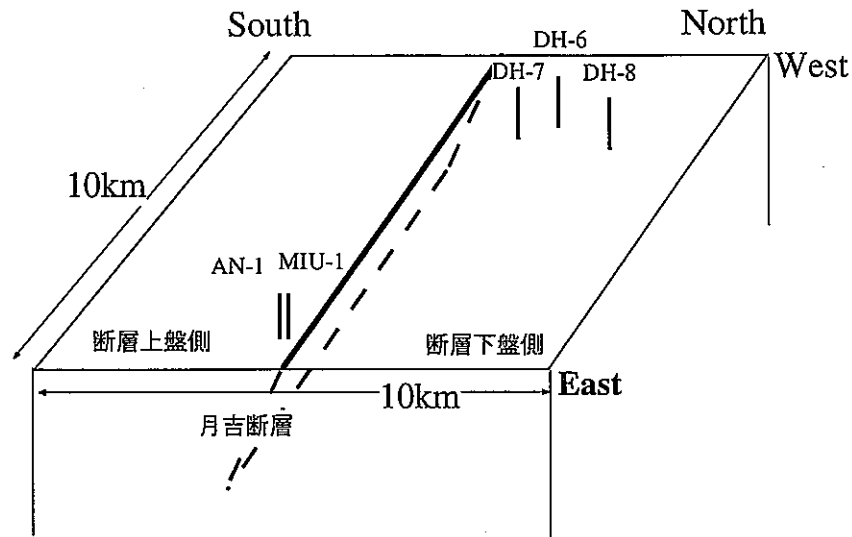


図-6.2.1 各孔における割れ目数と割れ目の方向性の深度変化
(DH-6,7,8 孔及び AN-1,MIU-1 孔)

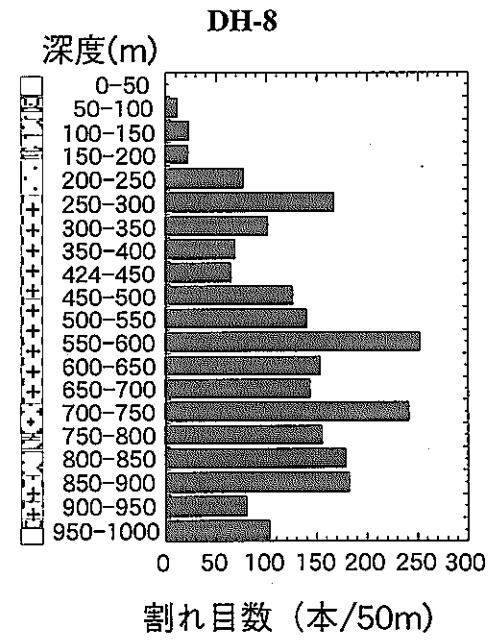
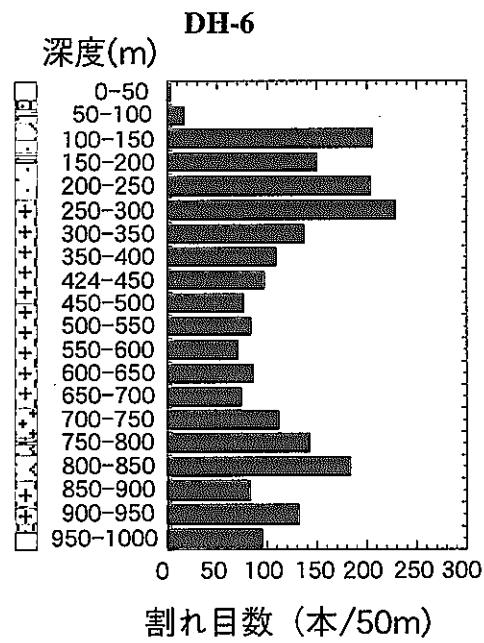
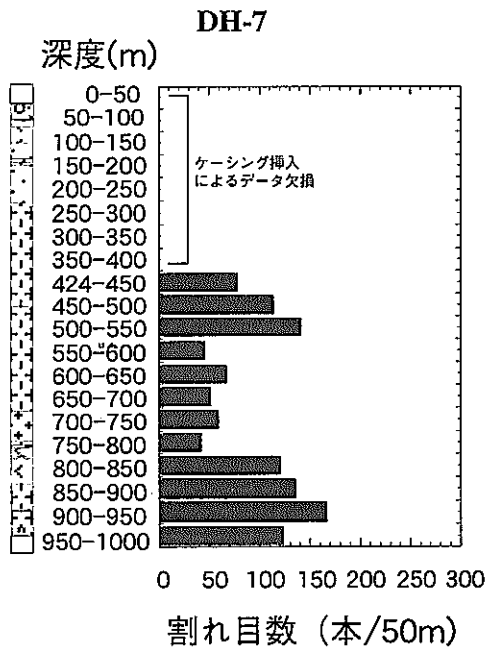
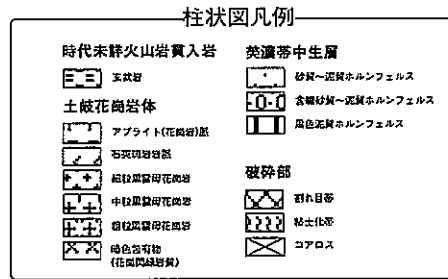


図-6.2.2 岩相区分と割れ目数の深度変化

7.まとめ

DH-6 ~ 8 号孔にて実施した土岐花崗岩の力学的特性に関する知見をまとめると以下のようになる。

- 1) DH-6 ~ 8 号孔における室内物性試験及び力学試験結果から、これらの孔においても土岐花崗岩の各物性値の深度方向の分布は一様ではなく、その分布傾向が 400 ~ 500m 地点、700 ~ 800m 地点で変化することがわかった。このような傾向は、超深地層研究所建設予定地点の試錐孔(AN-1, MIU-1)と同様であり、土岐花崗岩体では深度方向には岩石物性が不均一であるといえる。
- 2) DH-6 ~ 8 号孔における AE/DRA 法による鉛直応力測定結果は、地表~深度 1000m 程度まで範囲では、鉛直方向の応力成分が土被り圧とほぼ等しい結果を得た。また、超深地層研究所建設予定地点に掘削した MIU-1 号孔でも同様の結果であったことから、土岐花崗岩体中の鉛直応力成分は土被り圧と等しいと仮定することができると考えられる。しかし、AE/DRA 法の試験を実施した 4 号孔(DH-6 ~ 8 号孔, MIU-1 号孔)すべてについて、局所的には鉛直応力が土被り圧と一致しない部分が認められ、これは土岐花崗岩体中に水平方向に広がる不連続構造が存在する可能性を示唆していると考えられる。
- 3) 土岐花崗岩においては、物性値の深度方向の変化や割れ目分布と岩相の違いにほとんど相関関係が認めれていない。これは、物性値分布や割れ目分布の違いが、地質学的な岩相分布の違いよりもむしろ地殻変動などによる広域的な応力状態の変化といった力学的要因によってもたらされている可能性を示唆するものと考えられる。

8. 今後の予定

本報告で示した土岐花崗岩体の概念的な構造モデルは、あくまで力学的な調査結果に基づき構築したものである。今後は、本報告で示した力学的調査結果や土岐花崗岩体の概念的な構造モデルを、地質構造・水理・地球化学的調査結果等の他の調査結果と比較・検討し、最終的な 10km×10km の領域内での土岐花崗岩体の 3 次元構造のモデル化を行っていく予定である。

9. 参考文献

- 1)核燃料サイクル開発機構(1998):広域地下水流動研究 基本計画書, PNC TN7020 98-001.
- 2)核燃料サイクル開発機構(1999):広域地下水流動研究における試錐調査(DH-6 号孔), JNC TJ7440 99-025(1).
- 3)核燃料サイクル開発機構(1999):広域地下水流動研究における試錐調査(DH-7 号孔), JNC TJ7440 99-025(2).
- 4)核燃料サイクル開発機構(1999):広域地下水流動研究における試錐調査(DH-8 号孔), JNC TJ7440 99-025(3).
- 5)核燃料サイクル開発機構(1997):AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における力学特性調査結果, JNC TN7420 99-004.
- 6)幾世橋 広、加藤 春實、佐藤 稔紀(1998):地下深部の花崗岩質層の熱物性値の評価 - 比熱-, 第19回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp.184~186.
- 7)京 宗輔、幾世橋 広、加藤 春實、佐藤 稔紀(1998):地下深部の花崗岩質層の熱物性値の評価 -熱膨張係数-, 第19回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp.188~190.
- 8)幾世橋 広、加藤 春實、佐藤 稔紀(1998):地下深部の花崗岩質層の熱物性値の評価 - 熱伝導率-, 第19回日本熱物性シンポジウム講演論文集 pp.192~194.
- 9)Hiroshi KIYOHASHI, Harumi KATO and Toshinori SATO(1999): Microcrack effect on thermophysical properties of granitoid stratum at deep depth, Proceedings of the '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering , Fukuoka Japan , pp.557~564.