

MIU-2号孔における力学特性調査結果及び
月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル

平成12年3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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Naka-gun, Ibaragi 319-1194,

Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2000

MIU-2 号孔における力学特性調査結果及び 月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル

松井裕哉*、前田信行*、吉川和夫*

要旨

本調査は、岐阜県瑞浪市月吉地区に分布する土岐花崗閃緑岩を対象とした超深地層研究所計画の地表からの調査の一部として平成10年度に実施したものである。地表からの調査段階における岩盤力学的調査の最終目的は、①地表からの調査段階における初期的な岩盤力学的概念モデルを構築する、②超深地層研究所の設計に必要な力学的特性を把握する、の2点である。

MIU-2 号孔における調査は、大きく室内試験と原位置試験に分かれている。室内試験としては、コアを用いた物理試験と力学試験ならびに AE 法による応力測定を地表～深度1000m の範囲で実施した。原位置試験としては、水圧破碎法による初期応力測定を実施した。本報告では、同孔で得られた調査結果と既存の調査結果を比較・検討し、土岐花崗岩体の岩盤力学的特性の総合的評価を試みた。結果の概要は、以下の通りである。

- ・ MIU-2 号孔における室内物理・力学試験の結果から、鉛直方向に4つの異なる物性（空隙率、弾性係数等）を有するゾーンが存在することが推定された。すなわち、地表～深度400m程度、400～600m程度、600～900m程度、900m以深である。深度900m以深は、月吉断層形成時の力学的ダメージにより物性値の変化が生じた可能性が高いと推定される。岩石コアの2次元的・3次元的な弾性波速度測定結果から、岩石マトリックス部に若干の力学的異方性（P波速度の最大値と最小値で5～10%程度の違い）が認められ、その変化傾向は深度600m地点で異なることがわかった。
- ・ MIU-2 号孔における初期応力測定の結果から、鉛直応力分布は月吉断層上盤側ではほぼ土被り圧に等しいと考えられる。しかし、水平面内の主応力値は、一般的な知見と異なり、深度に伴い線形的に増加するような傾向は示さず、深度300m及び600m地点で極小値を取るような複雑な分布を示す。また、主応力方向についても、地表～深度400m、深度400～700mの間で、NS→NWW-SEE方向に回転するような特異な変化を示す。このような複雑な応力場の変化は、断層による影響と考えられる。
- ・ 同用地内で実施した既存の調査結果の比較(AN-1,MIU-1号孔)より、正馬様用地内の月吉断層の上盤側の岩体は、深度方向に少なくとも3つの異なる地質学的・力学的特性を有するゾーンに区分できると考えられる。また、この結果に基づき、正馬様用地内の月吉断層上盤側の岩体に関する岩盤力学的概念モデルを構築した。

**The results of the investigation on Rock mechanics in MIU-2 borehole and
the geomechanical conceptual model in Toki granitic body of hanging wall of
Tukiyoshi fault**

Hiroya MATSUI*, Nobuyuki MAEDA* and Kazuo YOSHIKAWA*

Abstract

The geomechanical investigations have been carried out in surface boreholes with 1000m depth since 1998 as a part of the investigations in pre-investigation phase in MIU(Mizunami Underground Research Laboratory) project. The objectives of the investigation are: ①to develop the geomechanical conceptual model in pre-investigation phase in MIU project, ②to obtain the mechanical data of Toki granite for the design of MIZUNAMI Underground Research Laboratory.

The geomechanical investigations in MIU-2 borehole were carried out in 1999 and the major reverse fault called Tukiyoshi fault approximately intersected at 900m depth in MIU-2 borehole. The investigations consist of three parts:

- ①Laboratory tests for the mechanical properties of rock matrix
- ②Stress measurement in laboratory with AE method
- ③In-situ stress measurement with hydraulic fracturing

This report is described on the results of geomechanical investigations in MIU-2 borehole. Additionally, the integration of the results of the geological, geophysical and geomechanical investigations in AN-1, MIU-1 and MIU-2 is attempted to establish a geomechanical conceptual model in Toki granite. The results are summarized as follows:

• In MIU-2 borehole, the distribution of each properties for Toki granite has different trend with each section, where are until 400m, from 400 to 600m, from 600m to 900 and over 900m. The difference of the rock mechanical properties over 900m is possible to be due to mechanical damage when Tukiyoshi fault was formed. The results of the seismic velocity measurements of the cores in two dimension show that a little anisotropy (the range is 5 to 20 percents) of rock matrix is detected and the gap of degree of anisotropy was found at 600m depth. The result of three dimensional seismic velocity measurement on rock matrix suggested that three major axis of the anisotropy are perpendicular each other and the axes are vertical and horizontal approximately.

• In MIU-2 borehole, the vertical component of stress tensors are almost equal to the overburden pressure in hanging wall of Tukiyoshi fault. The variation of magnitudes of horizontal stresses is not linear with depth. The directions of maximum principal stresses from surface to 400m depth and 400m to 700m were rotated from N-S to NWW-SEE direction with depth. The present stress state from surface to 1000m depth in horizontal plane at the location of MIU-2 borehole quite complicated. It is considered that Tukiyoshi fault has strongly influence to the present stress state in rock mass near the fault.

• As the results of the integration of different kinds of investigations, Toki granitic body in hanging wall of Tukiyoshi fault can be divided into three zone which have different rock mechanical properties and stress states. The first geomechanical conceptual model of Toki granitic body is made based on the integrated results.

* Japan Nuclear Cycle development institute (JNC)
Tono Geoscience Center Geoscience Research Execution 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. MIU-2 号孔における力学特性に関する調査項目	4
5. MIU-2 号孔における力学特性調査結果	6
5.1 室内試験結果	6
5.2 弾性波速度測定による土岐花崗岩の異方性に関する室内試験結果	13
5.3 初期応力測定結果	19
5.4 MIU-2 号孔における力学特性調査結果のまとめ	24
6. 考察	
6.1 AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における力学特性調査結果との比較	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
6.3 月吉断層上盤側の土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル	37
7. まとめ	39
8. 参考文献	40

APPENDIX 土岐花崗岩を対象とした水圧破碎法による初期応力測定の信頼性に関する検討

1.はじめに

核燃料サイクル開発機構は、岐阜県瑞浪市正馬様用地にて超深地層研究所計画を実施している。本計画は、現在地表からの調査を実施している段階であるが、この地表からの調査項目の一つとして正馬様用地内に分布する土岐花崗岩の岩盤力学的特性に関する調査がある。本調査の目的は、超深地層研究所の建設が予定されている正馬様用地内の土岐花崗岩体の力学特性を把握し、同研究所の設計・施工に反映することおよび地表からの調査～評価～解析～検証という一連の流れを通じて、岩盤力学的調査手法の体系化を図ることである。

本資料は、岩盤力学的調査の一環として、平成10年度に掘削した MIU-2 号孔における力学特性調査結果をとりまとめたものである。さらに、既報告の AN-1,MIU-1 号孔の調査結果⁵⁾と MIU-2 号孔における調査結果を総合し、正馬様用地内の土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデルを考察した結果についても述べる。

2.目的

本調査の目的は、以下の2点である。

- ①地表からの調査段階における初期的な岩盤力学的概念モデルを構築する。
- ②超深地層研究所の設計に必要な力学的特性を把握する。

3.調査位置及び地質構造

調査対象領域は、岐阜県瑞浪市に位置する正馬様用地である(図 3.1)。調査対象地域は、表層部(層厚は数 m~100m 程度)に新第三紀の堆積岩が分布し、それ以深は基盤となる土岐花崗岩より構成されている。既存の調査結果及びこれまでに掘削した深度 1000m の鉛直下向き試錐孔(AN-1 号孔,MIU-1 号孔,MIU-2 号孔)における調査結果に基づき構築された現段階での水理地質構造概念モデル¹⁾を図 3.2 に示す。MIU-2 号孔は、図に示される位置に掘削された鉛直下向きの試錐孔であり、深度 890m~915m の位置で月吉断層と交差している²⁾。これまでの調査結果から、調査領域の土岐花崗岩体は、黒雲母花崗岩と優白色花崗岩で構成されており、堆積岩との不整合面近傍で相対的に高透水性の花崗岩風化部が水平方向に連続的に存在することが推定されている。また、黒雲母花崗岩の部分では、深度 200~600m 程度の領域で相対的に低透水性のゾーンが存在することが推定されている。さらに、月吉断層沿いには 100m 程度の幅の破碎帯の存在が推定されている。

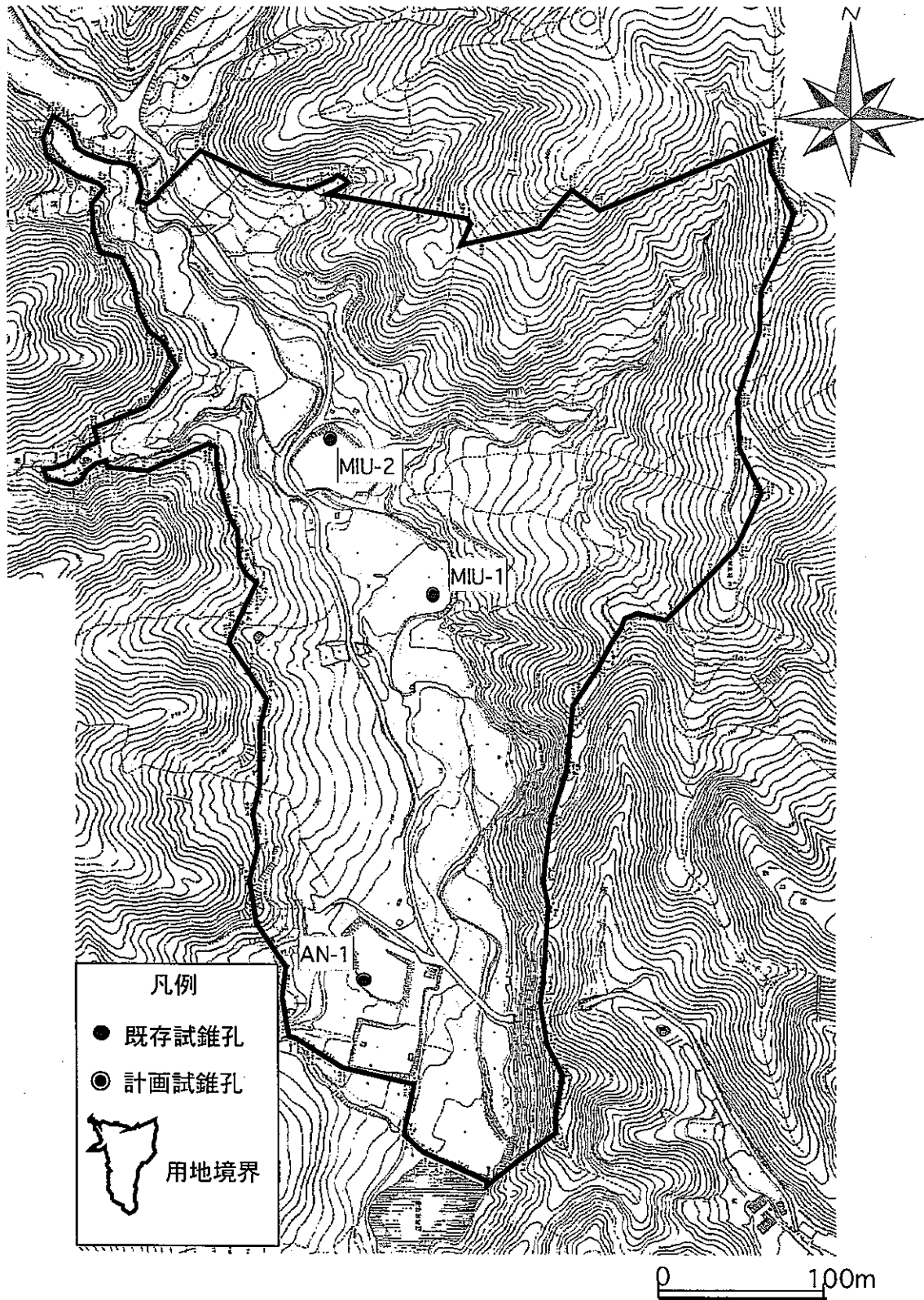


図3.1 正馬様洞用地及び試錐孔位置図（平面図）

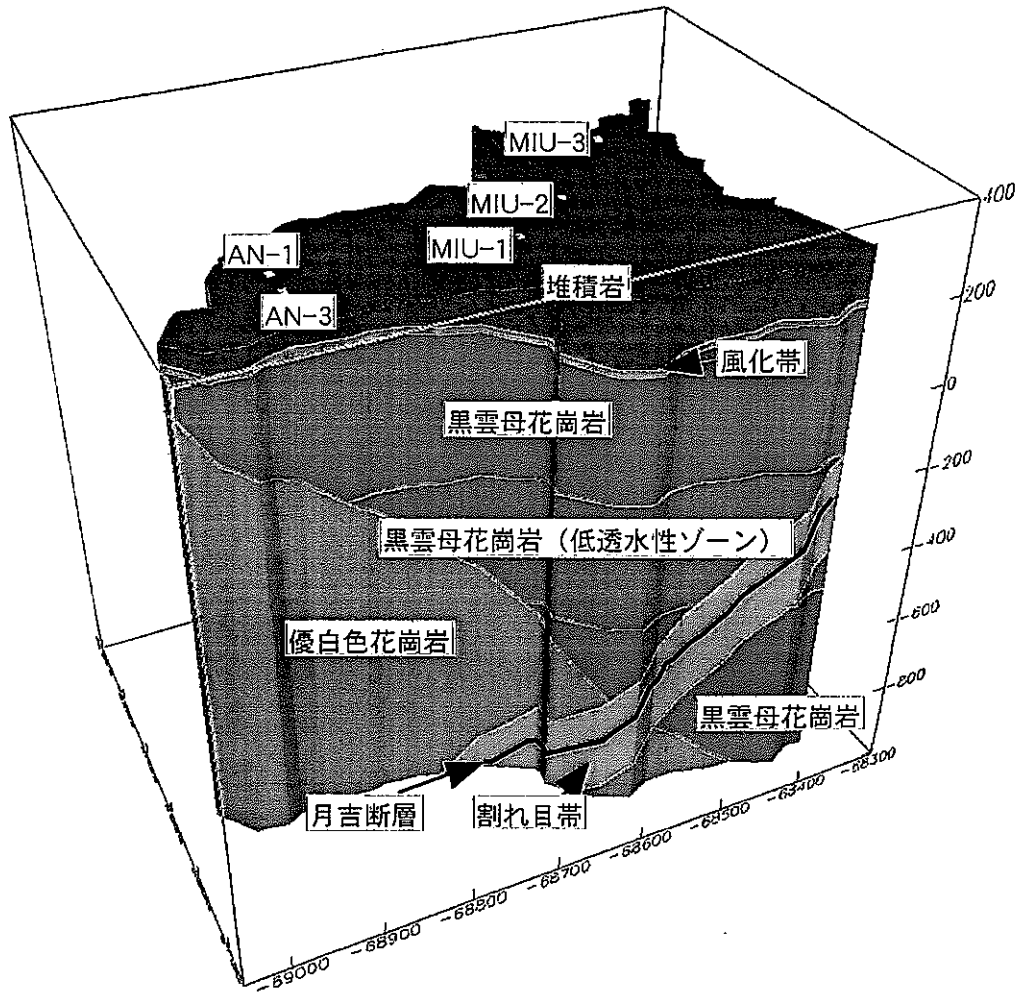


図3.2 正馬様用地における地質構造の概念図

4. MIU-2号孔における力学特性に関する調査項目^{2),4)}

MIU-2号孔における岩盤力学的調査としては、以下の項目を実施した。

- ・室内物理・力学試験
- ・初期応力測定（室内、原位置）

室内・力学試験は、MIU-1号孔と同様ほぼ100mピッチで供試体のサンプリングを実施し、物理試験及び力学試験及び熱物性試験を実施するとともに、水圧破碎試験時にも水圧破碎試験深度と同一箇所から供試体のサンプリングを実施し室内試験を行った。試験手法等の仕様を表4.1に示す。また、通常の岩石コアによる弾性波速度測定に加え、岩石の異方性が水圧破碎法による初期応力測定結果に及ぼす影響を検討するため、コア軸方向並びに周方向の弾性波測定と50面体に成形した試料を用いた弾性波測定を実施している。

表4.1 MIU-2号孔における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
試験調査時	物理試験	空隙率	ISRMの指針に準拠	20	一軸圧縮供試体のみ
		含水比	ISRMの指針に準拠	20	
		かさ比重	ISRMの指針に準拠	20	
		見かけ比重	ISRMの指針に準拠	20	
		弾性波速度測定(P,S波)	受発信子 200kHz	20	
	力学試験	一軸圧縮試験	荷重制御 (3kgf/cm ² /s) 軸ひずみ、横ひずみは ひずみゲージにより測定	20	一部、三軸圧縮試験を実施
		圧裂試験		40	
水圧破碎試験時	試験名	試験項目	試験仕様	数量	備考
	物理試験	比重	ISRMの指針に準拠	40	水圧破碎試験深度に合わせてサンプリングを実施
		弾性波速度測定(P,S波)	受発信子 200kHz 測定方向：コア軸方向。 コア周方向(22.5°ピッチ)	40	50面体に成形したコアを用いた弾性波速度計測も実施
	力学試験	一軸圧縮試験	荷重制御(3kgf/cm ² /s) 軸ひずみ、横ひずみは ひずみゲージにより測定	一軸：10	3封圧:10,20,30 MPa
		三軸圧縮試験		三軸：10×3 =30	

*上表以外の室内試験として、熱特性試験(熱伝導率測定、比熱容量測定、熱膨張率測定)も実施

初期応力測定に関しては、原位置計測として地表～月吉断層までの範囲で水圧破碎法による応力測定を、室内計測として岩石コアを用いた AE 法及び DRA 法による鉛直土被り方向の応力測定を実施した。月吉断層から下部の岩盤(深度 895m 以深)は、非常に割れ目が多く適当な応力測定区間が選定できなかったため応力測定を実施できなかった。表 4.2 に適用した各初期応力測定の仕様を示す。

表 4.2 初期応力測定仕様一覧

測定手法	目的	使用機器	備考
水圧破碎法	水平面内の応力状態を2次元的に把握する。	ストラドルパッカー 1本 (ウレタンゴム製、耐圧30MPa) インプレッションパッカー 1本 (ウレタンゴム製、耐圧30MPa) ケーブルウインチ 1台 (1.5kW、1000m対応) 高圧ポンプ 3台 (JHP-500W、3.5 l/min、35MPa) 制御システム (パソコン) 1台 (PC-9801T) A/Dコンバーター 1台 (ADC-116C) シグナルコンディショナー 1台 (CDA-230C) 圧力変換器 1台 (PGM-500KD、測定範囲49.03MPa) 流量計 1台 (MP-MCF-SLE、測定範囲 6.0 l/min) 坑井方位傾斜儀計 1台 (TYPE-SS、最小読み取り誤差1°)	試験箇所：20点 138.2m、158m、 187.3m、254m、 294.7m、301.5m、 356.4m、413.4m、 452m、491m、555m、 604m、651m、682m、 698.5m、 733.7m、761.3m、811.3 m、837.7m、878.1m
AE/DRA法	鉛直土被り方向の応力状態を把握する。	スクリュードライバー式材料試験機 1台 (インストロンジャパン製、8500PLUS、 容量10tf) AE計測器 1台 (トランスデューサー500kHz共振型、 プリアンプ40dB固定) ひずみ測定器 1台 制御システム (パソコン) 1台 ロードセル 1台 ひずみゲージ 4枚	試験箇所：10箇所 106.68~107.88m、 196.49~199.45m、 296.30~296.66m、 402.00~402.36m、 505.52~565.58m、 603.00~603.35m、 698.34~698.70m、 800.59~801.39m、 963.29~964.77m、 1002.20~1011.37m ローパスフィルター:500kHz 供試体上下のエンドピース内 にAEセンサーを入れ、位置評 定やノイズ除去などを行い、 供試体中央部から出てくるAE のみを検出する。 試料採取後3日以内に測定を 実施 DRA法による応力測定もあわ せて実施

5. MIU-2 号孔における力学特性調査結果 ^{2),4)}

5.1 室内試験結果

1) 物理試験結果

図 5.1.1 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。バラツキの大きい箇所も見られるが、各物性値の分布範囲は概略下記の通りである。なお、新鮮な岩石コアにもかかわらず、空隙率が極端に大きい岩石コア（2%以上）が存在したが、これらのコアは土岐花崗岩のマトリックス部の平均的な物性値を示していない可能性が高いと判断し、検討用データから除外した。

比重	: 2.51~2.65
有効空隙率	: 0.7~2.0%程度
含水比	: 0.24~0.5
弾性波速度	: 4.0~6.0km/sec 程度 (P 波速度), 2.0~3.0km/sec 程度 (S 波速度)
弾性係数(E_{50})	: 32~63GPa
一軸圧縮強度	: 130~240MPa
ポアソン比	: 0.3~0.46
粘着力	: 13~25MPa
内部摩擦角	: 55~63°

測定データのバラツキが大きいため、取得した各物性値と深度の関係をより明確にする観点で、相対的に最も相関係数の値が高い4次多項式による近似曲線も図中に並記した。

図 5.1.1 の結果を総合的に判断すると、MIU-2 号孔掘削地点における土岐花崗岩の物理物性は、深度方向に異なる変化傾向を有する4つのゾーンに区分できると考えられる。すなわち、地表~深度 400m 程度、深度 400~600m 程度、深度 600m~900m 程度、900m 以深である。各ゾーンには以下のような特徴が見られる。

ゾーン 1: 地表~深度 400m 程度まで

見かけ比重及び弾性波速度が小さく、含水比、有効空隙率が大きい。深度に伴い若干物性値が変化する傾向は認められる。

ゾーン 2: 深度 400~600m 程度

深度変化に伴う平均的な物性値の変化が相対的に小さい。

ゾーン 3: 深度 600~900m 程度

物性値は深度の増加とともに変化する傾向が認められる。見掛け比重、弾性波速度は、深度とともに増加し含水比と有効空隙率は深度の増加とともに小さくなる。

ゾーン 4: 深度 900m 以深

物性値はそれ以浅の領域の物性値から不連続的に変化している。

MIU-2 号孔は深度 890~915m で本調査領域を東西方向に横断する逆断層である月吉断層と交差しており、地質学的には月吉断層の上下盤で岩相が異なる（上盤側：黒雲母花崗岩、下盤側：優白色花崗岩）ことがわかっているが、現時点で岩相変化と岩石コアのb物性値との間に有意な相関関係は見られていない。このことから、深度 900m 以深の物理特性の不連続な変化は、月吉断層の生成時に付随して生じたダメージによる可能性がある。

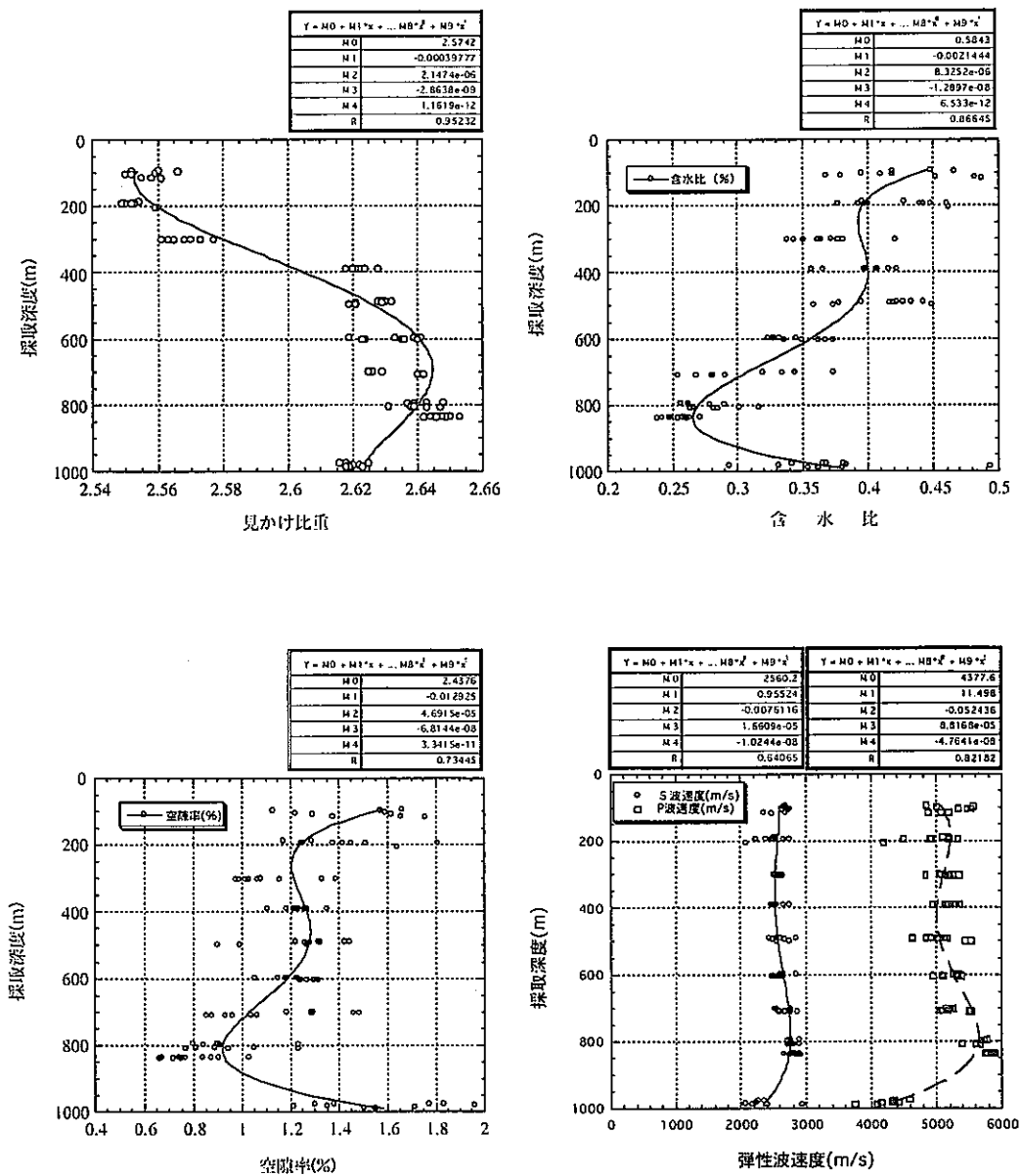


図 5.1.1 岩石の物理学的物性値とその深度方向の変化(MIU-2 号孔)

2)力学特性

図 5.1.2、5.1.3 に試験結果を示す。物理特性ほど明瞭ではないが、力学特性についても、物理特性の区分と同様に4つの物性ゾーンに区分できると考えられる。すなわち、地表～深度 400m、深度 400～600m 程度、深度 600m 程度～900m、900m 以深の領域である。以下、各ゾーンの特徴を記す。

ゾーン 1: 地表～深度 400m 程度

物性値のばらつきが相対的に大きい。弾性係数や一軸圧縮強度、圧裂引張強度については、深度の増加に伴い若干の増加が認められる。他の物性値の深度変化はほとんど認められない。

ゾーン 2: 深度 400～600m 程度

ゾーンの境界で物性値が不連続的に変化しており、静ポアソン比以外のすべての力学物性値が上下のゾーンに比べ、相対的に低くなっていることが特徴的である。

ゾーン 3: 深度 600m 程度～900m

弾性係数、静ポアソン比及び粘着力は深度とともに増加するような傾向を示す。他の物性値は、測定結果のばらつきが大きく変化の傾向は不明瞭である。

ゾーン 4: 深度 900m 以深

弾性係数と圧裂引張強度は、急激に低下しているが、それ以外の物性値（静ポアソン比、一軸圧縮強度、粘着力、内部摩擦角）は物理物性と異なりほとんど変化が認められない。

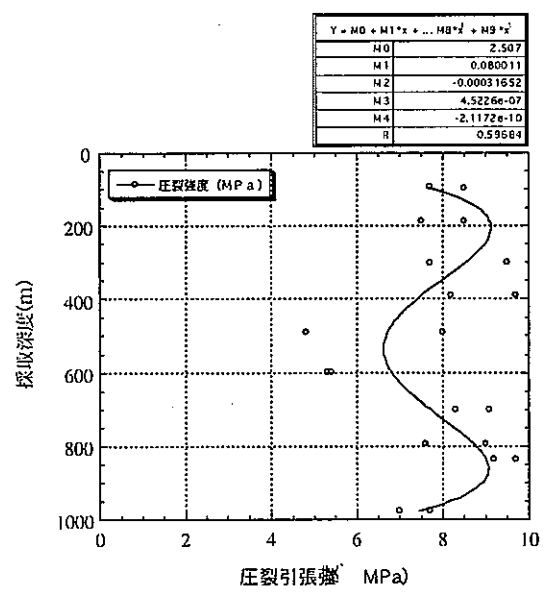
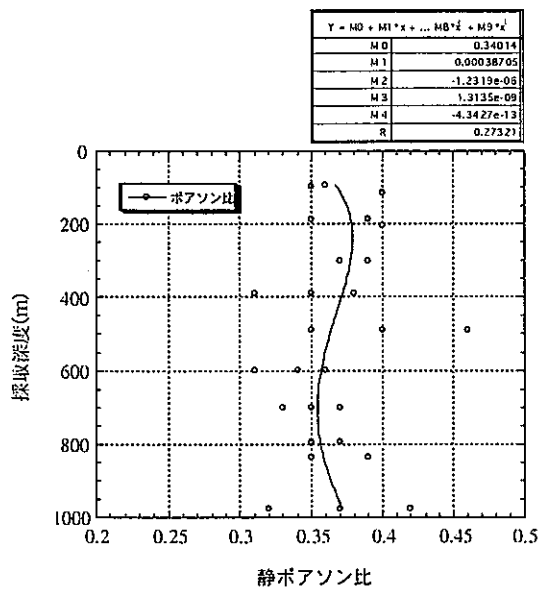
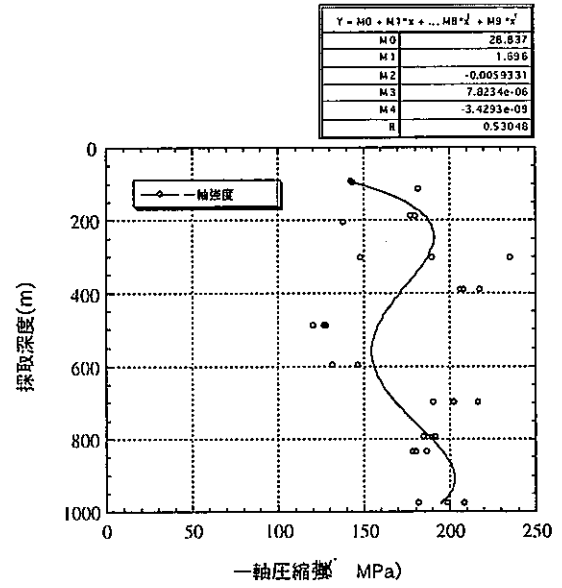
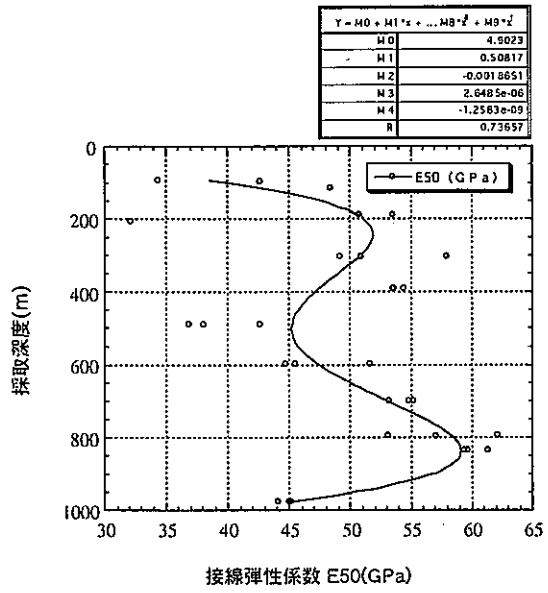


図 5.1.2 岩石の力学的物性値とその深度方向の変化(1)

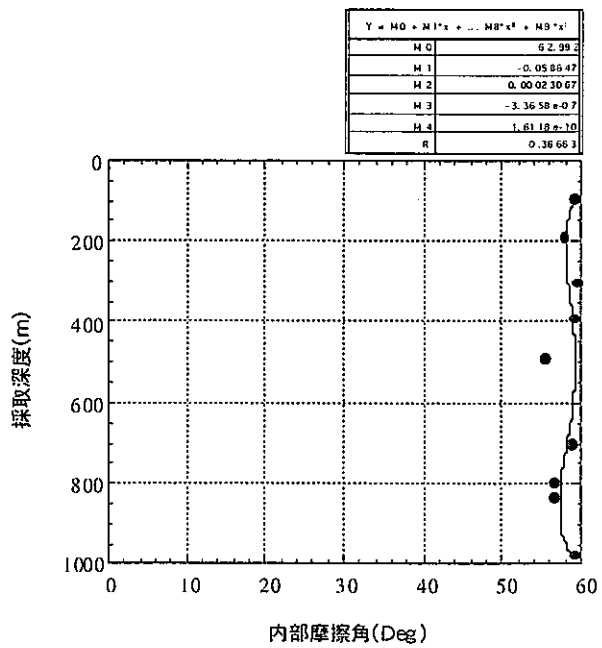
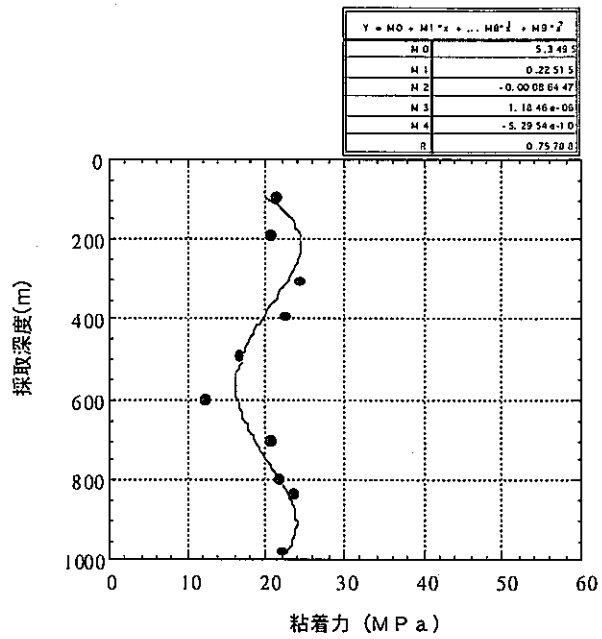


図 5.1.3 岩石の力学的物性値とその深度方向の変化(2)

3)各物性値間の相関性

図 5.1.4, 5.1.5 に測定した各物性値間の相関性を検討した結果を示す。相関係数が相対的に高い ($R=0.5$ 以上) ものは、有効空隙率～P 波速度、弾性係数～P 波速度、空隙率～弾性係数であった。これらの関係は、有効空隙率が大きいほど P 波速度と弾性係数が小さくなることを示しており、一般的な知見と矛盾しない。また、上記のような関係は、AN-1,MIU-1 号孔で得られた調査結果⁵⁾においても認められる。

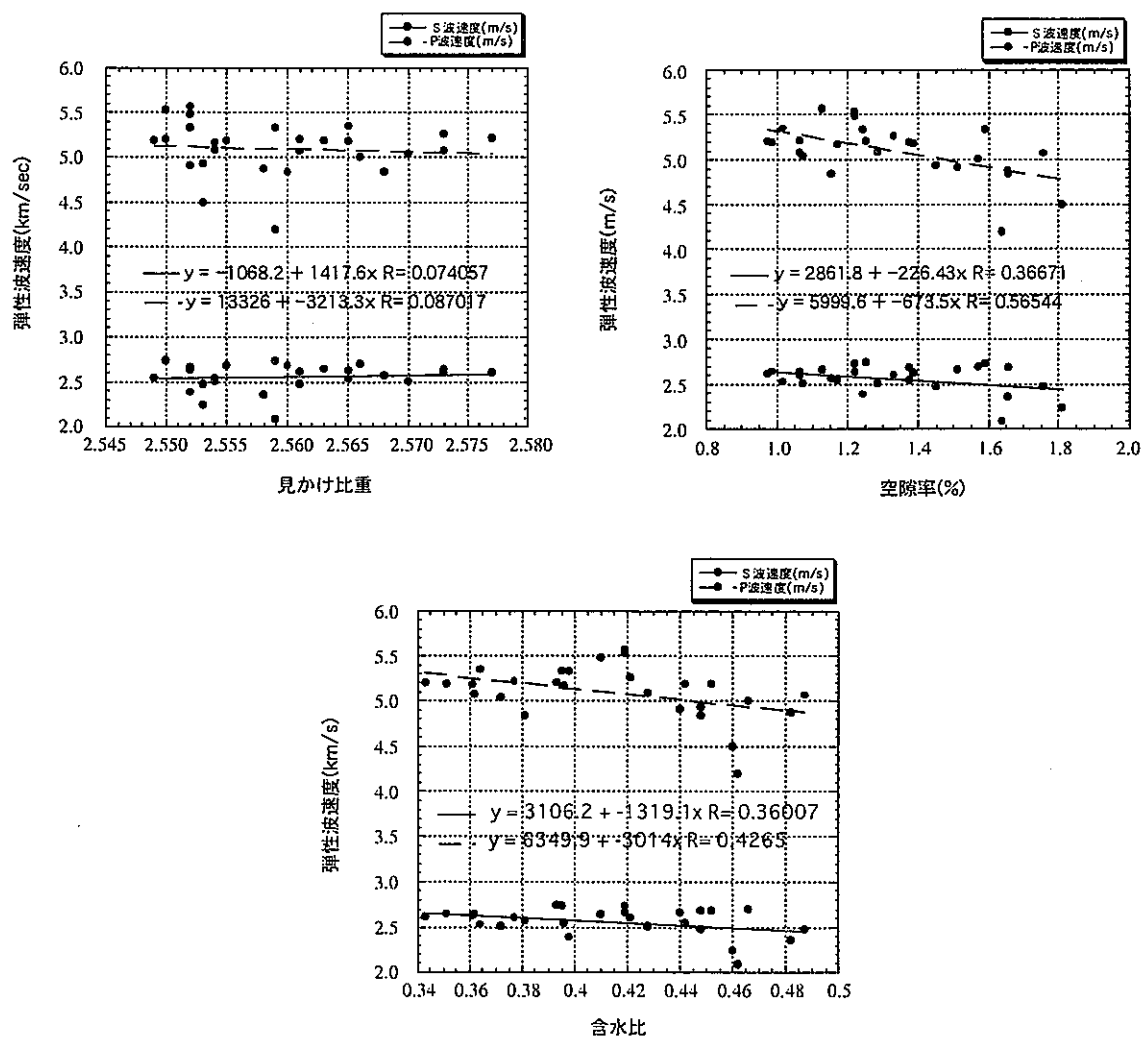


図 5.1.4 各物性値の相関性の検討結果 (1)

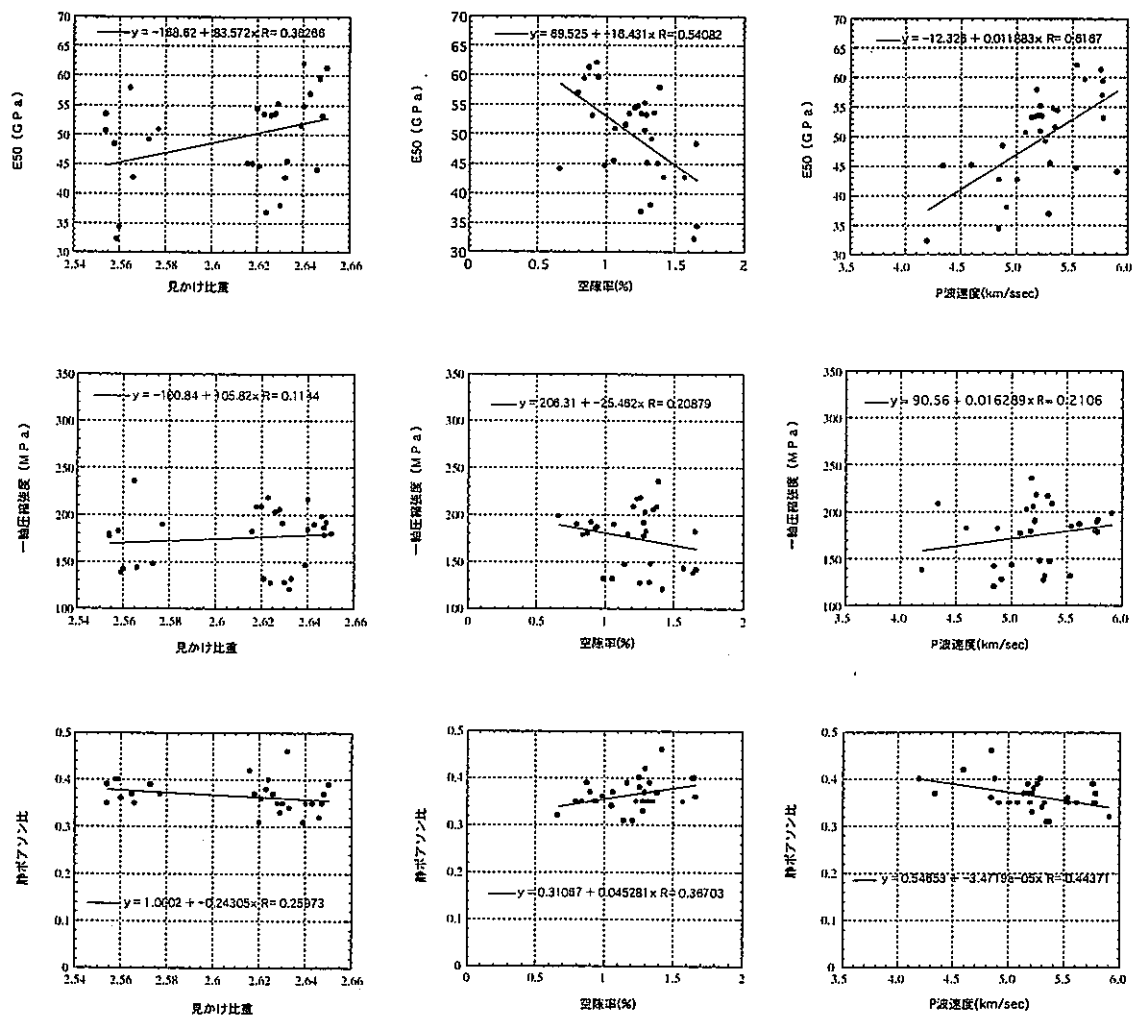


図 5.1.5 各物性値の相関性の検討結果 (2)

5.2 弾性波速度測定による土岐花崗岩の異方性に関する室内試験結果⁴⁾

1) コア軸方向および周方向の弾性波速度測定結果

MIU-2 号孔では、水圧破碎試験を実施した深度とほぼ同一深度から岩石コアを採取し、試錐孔軸方向の弾性波速度測定（P 波）に加え、コア周方向の弾性波速度を 22.5° ピッチで全周にわたり測定した。

測定結果を図 5.2.1 に示す。同図は、コア軸方向と直交する平面内のコア中心を通して伝播する P 波速度の分布である。コアは定方位で取得されていないため、横軸はコアの側面に設けた任意の基準点から時計回りに計った測線までの回転角を示す。また、破線は、コア軸方向の弾性波速度を示す。

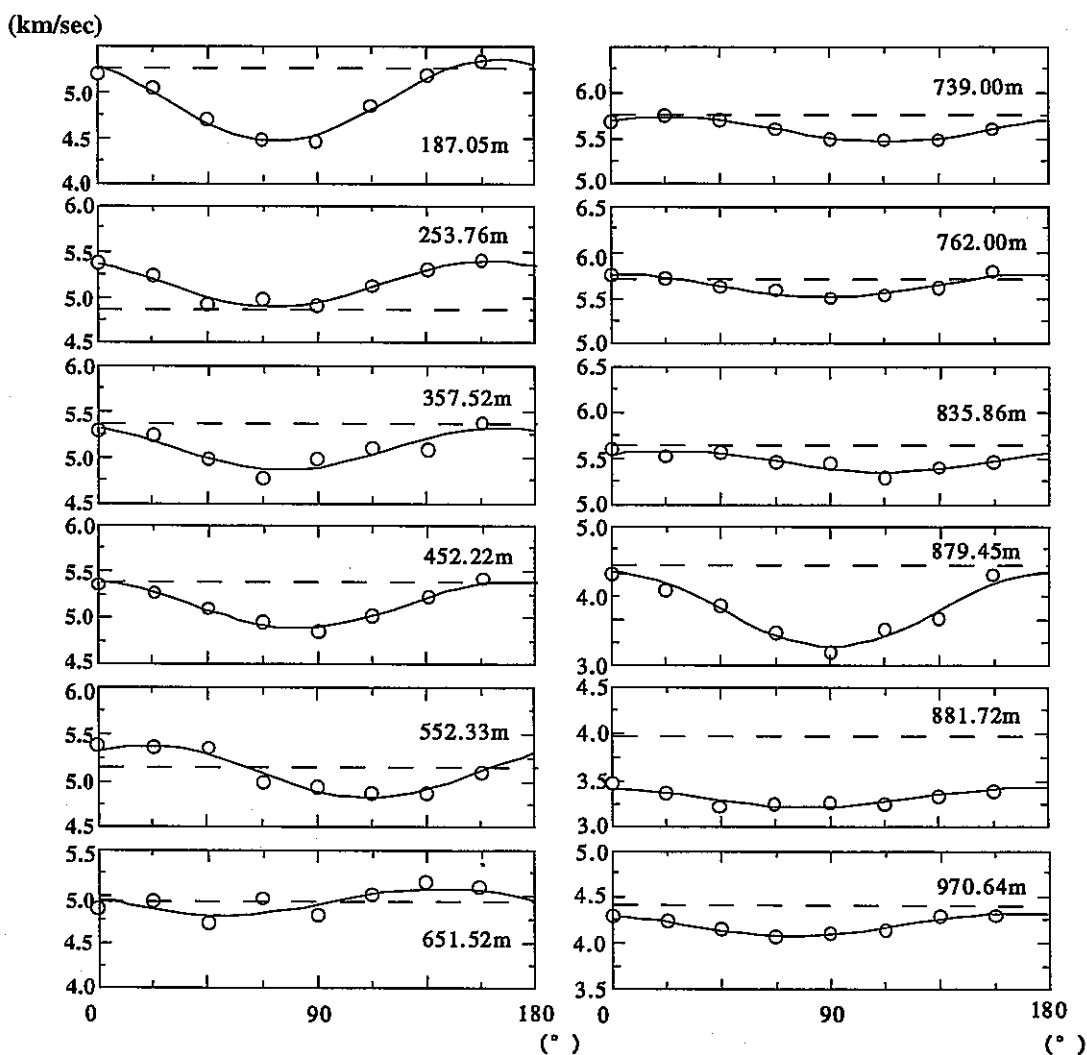


図 5.2.1 MIU-2 号孔の岩石コアを用いた室内弾性波速度測定結果
(破線：軸方向の弾性波速度、○：岩石コア周方向の測線で測定した弾性波速度)

同図より、各深度において採取されたコアの周方向の弾性波速度分布は、周期 π の速度異方性を有することが読みとれる。P波速度の最小値 $V_{p_{min}}$ と最大値 $V_{p_{max}}$ は 3.21~5.77km/s の範囲に分布している。表 5.2.1 は、周方向に測定したコアの弾性波速度分布を最小2乗近似した時の極大・極小値を示している。この、 $V_{p_{max}}$ と $V_{p_{min}}$ から、水平面内の速度異方性を $(V_{p_{max}}/V_{p_{min}}-1)\%$ という形で評価すると、深度 879.45m 地点の速度異方性は 32.7%と際だって大きい。しかし、直上の深度 881.72m 地点のコアの速度異方性が 6.2%であり、他のコアの速度異方性と同オーダーであることから、深度 879.45m のコアの速度異方性は局所的な地質の不均質性により生じた可能性が高いと考えられる。

表 5.2.1 弾性波速度測定結果一覧

採取深度(m)	V_{p_v} (km/s)	$V_{p_{min}}$ (km/s)	$V_{p_{max}}$ (km/s)	$((V_{p_{max}}/V_{p_{min}})-1)*100(\%)$	対応関係*
187.05	5.27	4.47	5.36	20.0	○
253.76	4.87	4.90	5.42	10.6	×
357.52	5.39	4.87	5.35	9.9	○
452.22	5.42	4.89	5.43	10.9	○
552.33	4.66	4.33	4.88	12.9	○
651.52	4.93	4.80	5.10	6.3	○
739.00	5.76	5.46	5.73	5.0	×
762.00	5.71	5.51	5.77	4.6	○
835.86	5.64	5.34	5.58	4.5	×
879.45	4.42	3.26	4.32	32.7	×
881.72	3.96	3.21	3.41	6.2	×
970.64	4.38	4.07	4.30	5.9	×

*対応関係とは、以下の関係を示す

DSCA法の仮定（主応力方向に垂直にクラックが生じ、その量は主応力の大きさに比例する）

が正しいとした場合、弾性波速度と応力環境との関係は以下ようになる（鉛直方向が主応力方向である場合）

$$\begin{aligned}
 V_{p_{max}} \cong V_{p_v} > V_{p_{min}} &\rightarrow S_H > S_v \cong S_h \\
 V_{p_{max}} > V_{p_v} > V_{p_{min}} &\rightarrow S_H > S_v > S_h \text{ (横ずれ断層型)} \\
 V_{p_{max}} > V_{p_{min}} > V_{p_v} &\rightarrow S_H > S_h > S_v \text{ (逆断層型)}
 \end{aligned}$$

深度 879.45m の値を除外すると、深度と水平面内における ($V_{pmax}/V_{pmin}-1$) の関係は図 5.2.2 のようになる。この図より、速度異方性の程度は、少なくとも深度 600m よりも浅い所と深い所で変化しており、異方性の程度は深度 600m 以深が 600m より浅い領域よりも相対的に小さい。全体的な速度異方性の分布傾向を見てみると、深度 600m を境にして速度異方性は約 10% から 5% まで不連続的に減少する傾向が認められる。

次に V_{Dmax} , V_{Dmin} 及びコア軸方向で測定した V_{pv} の関係を示したものを図 5.2.3 に示す。各速度の大きさを比較すると、深度 253.76m, 552.33m, 651.52m 及び 762.00m の 4 深度で $V_{Dmax} > V_{pv} \geq V_{Dmin}$ であり、他の 8 深度では $V_{pv} \geq V_{Dmax}$ である。一般に、弾性波速度の異方性は、コア内部のマイクロクラックの配向性に起因して生じると考えられるため、 V_{pv} が V_{Dmax} 以

上である場合は、地下深部の高応力状態から大気圧下に解放された岩石コアにおいて、内部のマイクロクラックが水平面内よりも鉛直面内で発達していることを示していると判断される。

一方、岩盤内部の初期応力の急激な解放に伴って生じるマイクロクラックの発達や既存のマイクロクラックの伸長を仮定して、岩石に静水圧をかけたときのひずみテンソルから初期応力を推定する方法として DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法がある。こ

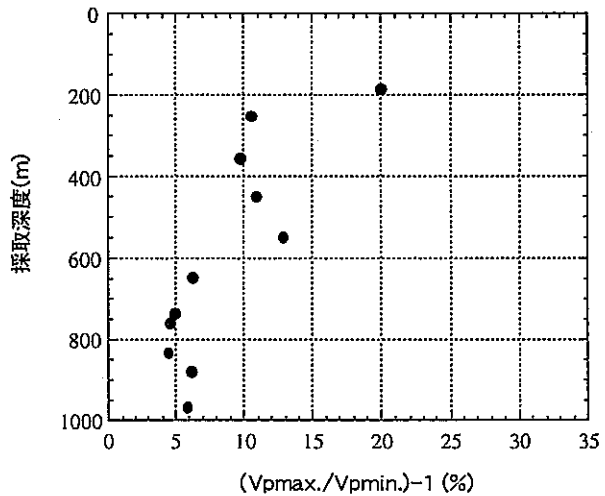


図 5.2.2 V_{pmax}/V_{pmin} の深度変化

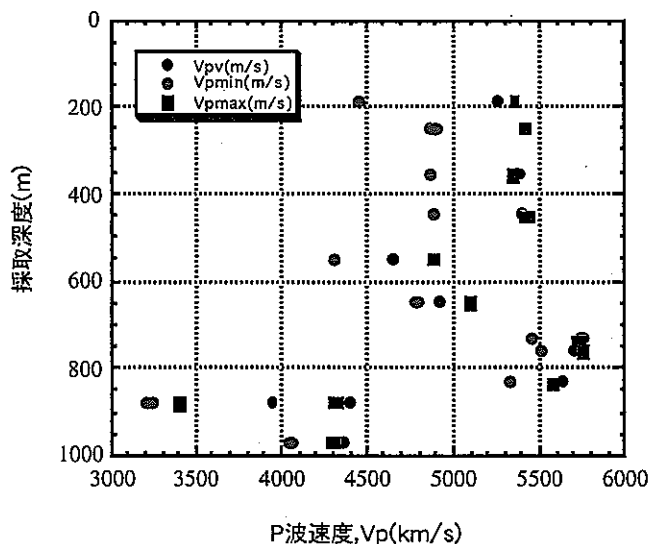


図 5.2.3 コア軸方向の弾性波速度 (V_{pv}) と水平面内の最大・最小弾性波速度 (V_{pmax} , V_{pmin}) の深度変化

の方法では、主応力方向に垂直にクラックが生じ、その量は主応力の大きさに比例すると仮定している。ここで測定した $V_{D_{max}}$ 、 $V_{D_{min}}$ および V_{D_v} は、コアの内部の配向性マイクロクラックの分布に関する情報を含んでいると考えられるので、もしも DSCA 法の仮定が正しくかつ主応力軸の方向の一つが試錐孔軸の方向と大きく違わなければ、初期応力状態が $S_H > S_v \approx S_h$ のときは $V_{D_{max}} \approx V_{D_v} > V_{D_{min}}$ 、 $S_H > S_v > S_h$ の横ずれ断層型の時は、 $V_{D_{max}} > V_{D_v} > V_{D_{min}}$ となることが期待される。表 5.2.1 の右の欄に印された○と×印は、水圧破碎試験から決定された応力環境と、測定した弾性波速度の異方性の関係が一致する場合とそうでない場合を示している。

深度 726m までの 8 個のコアのうち、6 個で速度異方性から推定される応力環境と水圧破碎試験から推定された応力環境とが一致し、このことはコア内部のマイクロクラックが初期応力の解法に伴って伸長するという仮定を満たしている。しかし、835.86m 以深で採取された 4 個のコアにはそのような対応関係は見られず、すべて $V_{D_v} > V_{D_{max}} > V_{D_{min}}$ となった。このような速度異方性は、835.86m 以深の応力環境が逆断層型であることを示唆するが、後述する水圧破碎試験によって測定された応力環境は横ずれ断層型である。

図 5.2.3 をみると、深度 835.86m から 881.72m にかけて、コアの弾性波速度は約 5.6km/s から 3.2km/s まで急激に低下しているが、5.1 で示した室内試験結果においても、見掛け比重が深度 840m 付近で不連続的に減少し有効空隙率は増加している。これらの結果は、深度 840m 以深での岩石コアのマトリックス部の空隙構造がその上部の岩盤と比べ大きく異なることを示しており、岩石コアの弾性波速度測定から得られた応力環境と原位置測定結果の差を生じた要因の一つと考えられる。また、この領域は、月吉断層形成時に形成された地質学的なダメージゾーン内に含まれることから、岩石マトリックス部の空隙構造変化は、断層形成時に生じた力学的ダメージにより生じた可能性がある。

2)多面体を用いた弾性波速度測定結果

土岐花崗岩の有する異方性を3次元的に把握するため、一例として、深度452.5mから採取された花崗岩を50面体に整形し、25測線のP波速度を測定した。これらの速度を上半球ステレオネット上にプロットし、等速度線を描くと図5.2.4のようになる。ここで、 x, y, z 軸は試験片中央に固定された直交座標系で、 $y-z$ 平面は試験孔軸と垂直で x 軸は試験孔軸と一致する。

まず、P波の空間的な速度分布に着目すると、そこには明瞭な3つの極値が存在し、それらの方向はお互いにほぼ直交していることが認められる。すなわち、最も速度の大きい極P1および最も速度の遅い極P3は、それぞれ $z-x$ 平面及び $x-y$ 平面にほぼ含まれ、極P1と極P3を含む平面は水平面から約 20° 傾斜している。岩石の弾性主軸に垂直な面内を伝播する弾性波速度は、剛性率が極端に大きい場合および小さい場合を除くと主軸の方向だけ

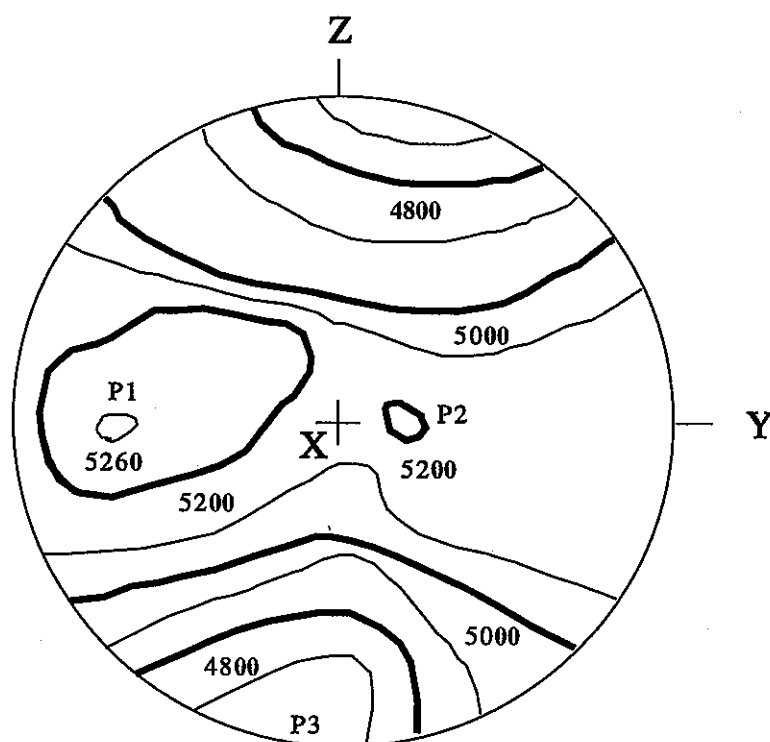


図 5.2.4 50 面体における弾性波速度の 3 次元分布

で極値をとるため、同図の3つの極の方向はそれぞれ本試験片の弾性主軸の方向と一致すると考えられる。さらに、弾性主軸の方向がお互いに直交することから、図の速度分布は土岐花崗岩がほぼ直交異方性を有することを示している。次に弾性波速度の大きさについてみると、 $z-x$ 平面内及び $x-y$ 平面内の速度異方性はそれぞれ11.8%及び2.8%である。従って、幾つかの極値は存在するものの、 $x-y$ 平面内における速度異方性は小さく、弾性波速度は $z-x$ 平面内よりもかなり等方的である。すなわち、本試験片はほぼ横等方性体である。しかも、最も速度の遅い極P3がほぼ水平面内にあることから、配向性マイクロクラックが最も発達している面はコア軸を含む鉛直面とほぼ一致する。

前節で述べたように、2次元的な弾性波速度測定では、12個の試験孔のうち8個の軸

方向（鉛直方向）の弾性波速度 V_{p_v} が水平面内における P 波速度の最大値 $V_{p_{max}}$ とほぼ等しかった。 $V_{p_v} > V_{p_{max}}$ の場合であっても、881.72m のコアを除けば、 V_{p_v} は $V_{p_{max}}$ のわずか 1.02 倍以下であって、コア軸方向と $V_{p_{max}}$ の方向を含む平面内の速度異方性は非常に小さい。この結果は、前出の 3 次元的な弾性波速度測定の結果と調和的であることから、地表～深度 1000m の範囲では、試錐によって採取された土岐花崗岩のコアの力学的異方性の主軸は、水平面内と鉛直軸方向にありかつ横等方性の性質を有する岩石である可能性が高い。

5.3 初期応力測定結果

1)室内測定結果²⁾

本孔では、鉛直方向応力成分の深度分布を把握するため、MIU-1号孔と同様にAE/DRA法による応力測定を実施した。図5.3.1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法による測定は、カイザー効果の時間依存性⁸⁾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。

MIU-2号孔におけるAE法の測定結果は、MIU-1号孔の結果と異なりDRA法よりも測定値のばらつきが大きい。これは、AE測定時のAEセンサー設置位置が、供試体両端面部分であったことによる可能性がある。このため、本孔においては、主としてDRA法による測定結果によって鉛直応力の深度変化を評価することとする。

DRA法の結果では、深度が800mの地点、すなわち月吉断層の上盤側の岩体では測定結果が単位体積重量から想定される土被り圧とほぼ等しい。月吉断層下盤側の測定結果では、鉛直応力が土被りに比べ低めに評価されている。AE法の測定結果は測定値の絶対値の信頼性は低いが、DRA法の結果と同様月吉断層下盤側の岩体で鉛直応力成分が若干低めに評価されている傾向が見られる。これらの結果は、断層下盤側で鉛直応力成分が深度から評価される土被り圧よりも低くなっている可能性を示していると考えられる。

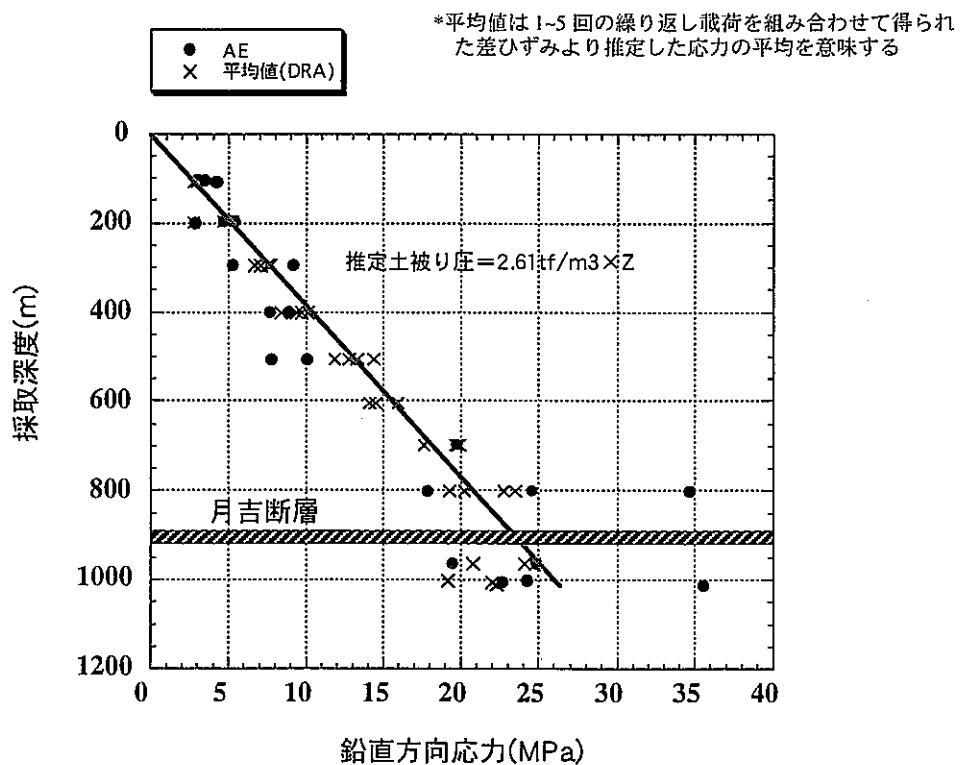


図 5.3.1 AE 法及び DRA 法により算定された鉛直方向の初期応力 (MIU-2 号孔)

2)原位置測定結果⁴⁾

図 5.3.2 に水圧破碎法の結果から算定された最大・最小主応力値の深度分布を、図 5.3.3 に最大主応力方向の深度変化をそれぞれ示す。本孔では、月吉断層下盤側は非常に天然亀裂が多く割れ目を含まないように測定区間を設定することが困難であったため、断層上盤側においてのみ測定を実施している。深度 604~698.5m の地点以外は、水圧破碎時に造成された亀裂はすべて試錐孔軸方向にほぼ平行な縦亀裂であり、解析上の理論的な仮定は満足されていると考えられる。

深度 604~698.5m の地点では、造成亀裂そのものは試錐孔軸にほぼ垂直であるがシェフロン状の微細な亀裂を伴っている。これは、鉛直方向が最大主応力方向の一つと一致していない、すなわち主応力方向が鉛直方向から傾斜していることを示している。また、本孔のような深度が深い試錐孔での測定結果は、岩盤中の間隙水圧を考慮するか否かで算定される最大主応力値が大きく異なるため、図 5.3.2 には両者の値(σ_{Hmax} , σ_{Hmin})を示している。図 5.3.3 に示される誤差範囲は、造成された縦亀裂を最小二乗法により直線近似した際に得られる誤差範囲を示す。

図 5.3.2 より、MIU-2 号孔周辺の岩盤の応力状態は、 σ_H , σ_h , σ_v の関係で整理すると、深度 0~200, 200~500m, 500~1000m の3つのエリアに大きく区分される。すなわち、深度 0~200m の範囲では、応力状態が $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ となるいわゆる逆断層型の応力状態であり、深度 200~500m の範囲では応力状態が $\sigma_H > \sigma_h \approx \sigma_v$ 、深度 500m~月吉断層近傍までは、 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ の横ずれ断層型となっている。また、深度 300m 及び 600m 付近に相対的に低い応力値を示している箇所が認められる。特に、深度 600m 付近の応力値の不連続点は、前述の弾性波速度異方性の不連続的な変化傾向を示した箇所と対応しており、水平面内の初期応力の大きさが 600m 付近から全体的に低応力側にシフトする傾向や応力環境が逆断層型から横ずれ断層型に変化する傾向と比較的良好な対応関係にある。

図 5.3.3 には計測された最大主応力の方向を示す。特徴的なことは、最大主応力方向は地表~深度 400m, 深度 400~700m, 700m~月吉断層近傍の3つの領域で水平面内の最大主応力方向が回転するような傾向を示している。具体的には、地表~深度 400m, 深度 400~700m の領域内で、それぞれ最大主応力方向が深度の増加とともに NS→NSW 方向に約 60 度回転している。また、深度 700m~月吉断層近傍の領域でも NS→NSW 方向に回転してまた戻るといったようなトレンドを示す。このような複雑な応力状態は、月吉断層の影響により生じているものと考えられる。また、上記の結果は、AN-1 号孔の結果と同様、MIU-2 号孔の地点の断層上盤側の領域に関しても Stress decoupling が生じていることを示している。

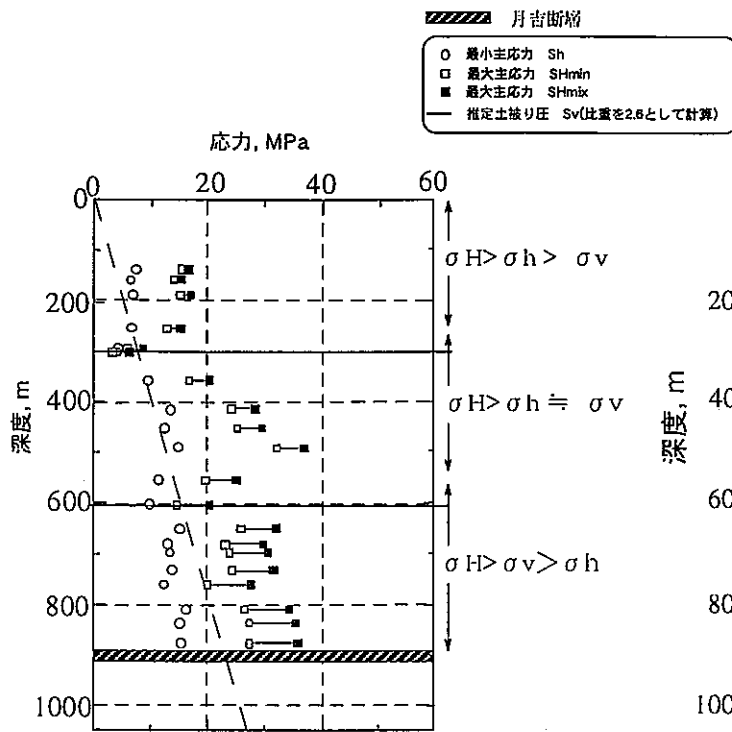


図 5.3.2 深度方向の水平面内応力分布

最大主応力の方位

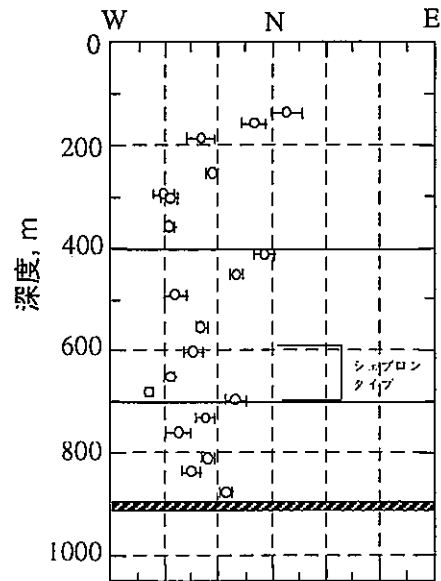
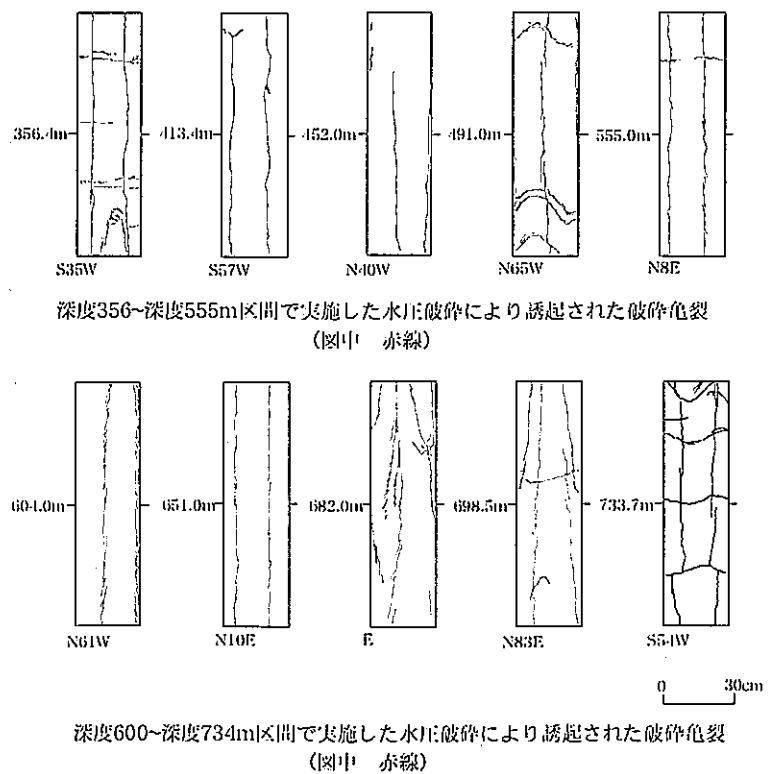


図 5.3.3 深度別の最大主応力方向

図 5.3.4 に深度 600~700m 区間で実施した水圧破碎により誘起された破碎亀裂の型取り結果を示す。これらの破碎亀裂は、5~10 度程度の緩い角度で試錐孔軸方向から斜交しており、シェブロン型を呈していることが特徴である。これは、試錐孔軸の方向と主応力軸の一つが一致するという仮定と異なることを示している。



深度600~深度734m区間で実施した水圧破碎により誘起された破碎亀裂 (图中 赤線)

このため、水圧破碎法によって測定した σ_1, σ_3 および鉛直

図 5.3.4 水圧破碎により誘起された亀裂

応力成分 σ_v から、この領域の 3 次元応力状態に関する考察を行っている。原位置応力のもとで発生する孔壁上の 3 次元応力状態は弾性理論に基づき次式で表される（座標系については、次ページ図参照）。

$$\begin{aligned} P_\theta &= \sigma_x + \sigma_y - 2(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}\sin 2\theta - P \\ P_z &= -2\nu(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + 4\nu\tau_{xy}\sin 2\theta + \sigma_z \\ P_{\theta z} &= -2\tau_{xz}\sin \theta + 2\tau_{yz}\cos \theta \end{aligned}$$

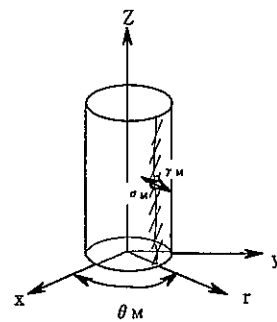
また、試錐孔壁面の最小主応力値 σ_M は、式の試錐孔軸方向の応力 P_z 接線応力 P_θ およびせん断応力 $P_{\theta z}$ から式のように表される。

$$\sigma_M = \frac{1}{2} \left\{ (P_\theta + P_z) - \sqrt{(P_\theta - P_z)^2 + 4P_{\theta z}^2} \right\}$$

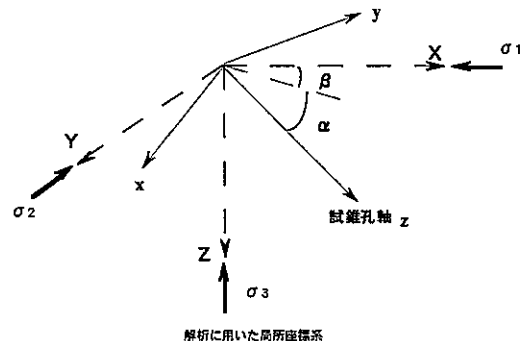
試錐孔壁への流体圧 P の内圧増加により σ_M が岩盤の引張強度 T と等しくなった時点で最初の亀裂が発生する。試錐孔軸に対する傾斜角 γ_m は次式で計算される

$$\gamma_m = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2P_{\theta z}}{P_\theta - P_z} \right]$$

γ_m は、主応力値、主応力軸に対する試錐孔の方位、岩盤の引張強度およびポアソン比によって変化する。ここでは、右図のような座標系を定義し、水圧破碎試験によって求めた深度 650m 付近の応力値を深度 600~700m 程度までの範囲における岩盤内の初期応力と仮定し、任意の方向を向いた試錐孔に形成される水圧破碎時の亀裂の傾斜角度を求めた。なお、 $\sigma_1=S_H=24.0\text{MPa}$ 、 $\sigma_2=S_v=\gamma_z=18.0\text{MPa}$ 、 $\sigma_3=S_h=13.5\text{MPa}$ とし、岩石の引張強度及びポアソン比はそれぞれ 8MPa、0.3 と仮定した。また、 α は試錐孔軸と XY 面内のなす角度、 β



3次元応力場における破砕亀裂の発生位置



解析に用いた局所座標系

は試錐孔軸を X-Y 面内に投影した直線から X 軸までの角度である。同図の試錐孔に関する X,Y,Z のうち、y 軸は X-Y 平面に含まれる。

図 5.3.5 は、 α と β の値を変えたときに破碎亀裂の傾斜角 γ_m がとりえる値の範囲をコンターとして示したものである。仮定した応力及び物性条件の下で試錐孔軸の主応力軸に対する傾きによって亀裂の傾斜角 γ_m は $0\sim 25^\circ$ の範囲で変化し $\alpha=40^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 付近で最大値を取ることがわかる。 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$ のとき試錐孔軸は中間主応力軸と一致（図中の Y 軸）と一致し、MIU-2 号孔のように試錐孔軸が鉛直である場合初期応力状態は横ずれ断層型の応力環境となる。MIU-2 の深度 550m 以深で誘起された縦亀裂は深度 600~700m 区間を除き試錐孔軸にほぼ平行でありかつ応力状態は横ずれ断層型であるため、中間主応力軸が試錐孔軸と一致する前述の状態と対応していると考えられる。深度 600~700m では、傾斜角 γ_m は最大 15° 程度であるが、 $5\sim 10^\circ$ 程度のものがほとんどである。このため、 γ_m が $5\sim 10^\circ$ となる α, β の範囲から試錐孔軸と主応力軸の傾きがどの程度であるかを検討する。まず、図より γ_m が $5\sim 10^\circ$ の範囲は β 軸に対してほぼ 2 本の帯状をなして分布していることがわかる。ところが、 α が $48\sim 80^\circ$ の場合、試錐孔軸は σ_3 の方向に最も近づき、この状態の応力環境は正断層型であるから、測定結果が横ずれ断層型であることと矛盾する。従って、 α の範囲は $7\sim 25^\circ$ 程度になることが推定できる。また、 β のとりうる範囲については、測定された水平面内の最大主応力と最小主応力の差が大きいことから、最大主応力方向から 90° 近い方向であると考えられる。

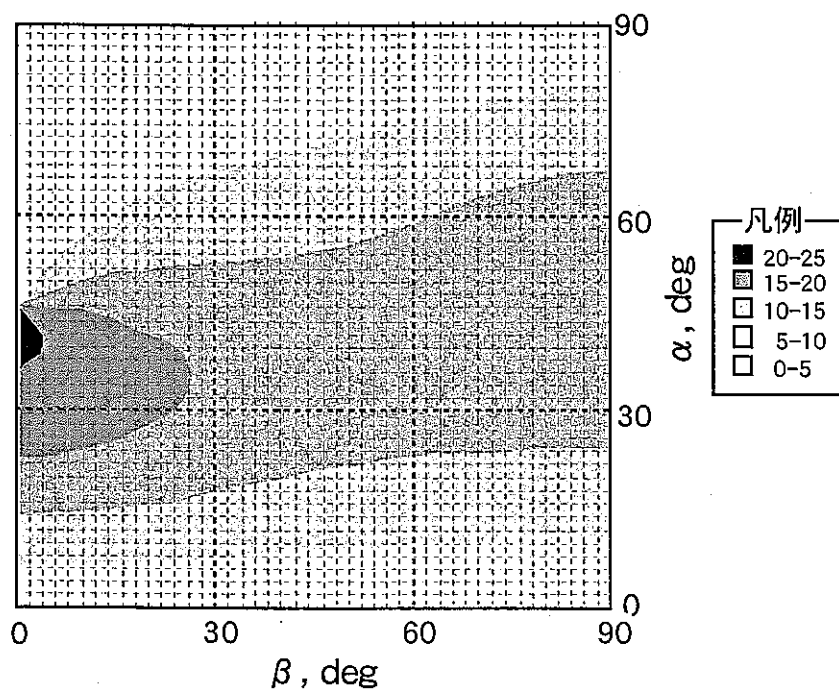


図 5.3.5 試錐孔軸が主応力軸と一致しない場合の α と β の分布範囲

5.4 MIU-2 号孔における力学特性調査結果のまとめ

MIU-2 号孔においては、既存の調査と同種の調査(室内物理・力学試験、AE 法及び水圧破砕法による初期応力測定)とともに、室内弾性波速度測定により岩石マトリックス部の異方性についても検討した。これらの結果から得られた知見を以下にまとめる。

1. 室内物理・力学試験

- ・ 岩石マトリックスの物理物性（密度、有効空隙率、弾性波速度等）や力学物性（弾性係数、一軸圧縮強度、圧裂引張強度等）の深度分布から、MIU-2 号孔においては、鉛直方向に4つの異なる物性を有するゾーンが存在することが推定された。すなわち、地表～深度 400m 程度、400～600m 程度、600～900m 程度、900m 以深である。
- ・ 深度 900m 以深は、月吉断層生成時のダメージにより物性値の変化が生じている可能性がある。

2. 弾性波速度測定による岩石マトリックスの力学的異方性の検討

- ・ 岩石コアの軸方向及び周方向の弾性波速度を測定した結果、若干の異方性（P 波速度の最大値と最小値で 5～10%程度の違い）が認められ、その変化傾向は深度 600m 地点を境に異なることがわかった。
- ・ 50 面体に成形した岩石供試体の弾性波速度を測定した結果、月吉断層上盤側の土岐花崗岩は、鉛直方向に極小値を持つような横等方性の性質を有する可能性が高いことがわかった。

3. 初期応力測定

- ・ 鉛直応力分布は、月吉断層上盤側ではほぼ土被り圧に等しいが、深度 900m 以深では土被り圧よりも低くなるような傾向を示した。
- ・ 水平面内の主応力値は、一般的な知見と異なり深度に伴い線形的に増加するような傾向は示さず、深度 300m 及び 600m 地点で極小値を取るような複雑な分布を示す。また、主応力方向についても、地表～深度 400m、深度 400～700m の間で、NS→NW 方向に回転するような特異な変化を示す。
- ・ MIU-2 孔の位置においては、初期応力状態は深度方向に“Stress Decoupling”を呈していると考えられる。
- ・ 深度 600～700m の区間においては、主応力軸の一つが鉛直軸と一致せず傾いている可能性がある。

6.考察

MIU-2 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とともに、その結果から考えられる岩盤力学的概念モデルについて述べる。

6.1 AN-1 号孔及び MIU-1 号孔における力学特性調査結果との比較

1)岩石の力学特性

表 6.1.1 に AN-1,MIU-1 および MIU-2 号孔で実施した室内物理試験・力学試験で得られた結果の平均値を示す。また、図 6.1.1 に AN-1,MIU-1 および MIU-2 号孔で実施した土岐花崗岩の物理・力学特性の深度方向の分布を示す。ここで、AN-1~MIU-1 の孔間距離は 250m 程度、MIU-1~MIU-2 号の孔間距離は約 100m である（各試錐孔の位置関係については図 3.1 を参照）。

表 6.1.1 AN-1,MIU-1 及び MIU-2 号孔における室内力学試験結果一覧

		AN-1	MIU-1	MIU-2
物理的性質				
見かけ比重	平均値	2.605	2.621	2.610
	標準偏差	0.009	0.011	0.030
有効空隙率	平均値	1.404	1.328	1.192
	標準偏差	0.263	0.25	0.272
含水比	平均値	0.233	0.444	0.362
	標準偏差	0.047	0.084	0.068
弾性波速度(P波)	平均値	4.511	5.476	5.118
	標準偏差	0.373	0.274	0.520
力学的性質				
弾性係数(E50)	平均値	47.276	55.95	49.968
	標準偏差	8.048	5.941	7.450
一軸圧縮強度	平均値	197.16	180.11	165.915
	標準偏差	44.7	38.297	34.528
ポアソン比	平均値	0.335	0.32	0.372
	標準偏差	0.03	0.04	0.039
圧裂強度	平均値	8.472	7.18	7.920
	標準偏差	1.818	1.825	1.417
粘着力	平均値	—	39.04	22.785
	標準偏差	—	8.914	4.886
内部摩擦角	平均値	—	52.596	57.715
	標準偏差	—	4.582	2.495

表 6.1.1 では、MIU-2 号孔の平均物性値は AN-1 号孔に近く、MIU-1 号孔の結果よりも総じて低くなっている。具体的には、物理特性に関しては単位体積重量、空隙率、含水比、弾性波速度いずれの値も MIU-1 号孔に比べ小さい。力学特性についても同様であり、内部摩擦角とポアソン比については、MIU-1 号孔の結果より大きいがそれ以外の物性値は小さくなっている。

図 6.1.1,6.1.2 に各孔別の岩石マトリックス部の物理物性および力学物性の深度変化を示す。反射法弾性波探査の結果⁹⁾からは、AN-1 号孔と MIU-1 号孔の間に大規模な不連続面と考えられる反射面が捉えられていると同時に、同探査結果から岩盤内の構造がその反射面の両側でかなり異なっている可能性がある。このため、AN-1 号孔の付近の原位置岩盤物性と AN-1 号孔より北に掘削した試錐孔(MIU-1 以降)の調査試験から得られた原位置岩盤の物性を比較する場合は注意を要するが、ここでは岩石マトリックスについては地質学的に岩種が同じであればその工学的性質も同じであると仮定し比較を行う。

物理物性値の深度変化を見ると、相対的に AN-1 号孔→MIU-2 号孔に向かう（南から北に向かう）に従い、深度方向の物性分布の変化が大きくなる傾向があるように見える。力学物性値の深度変化については、弾性係数の深度方向の分布にそのような傾向が若干認められるものの、他の物性値については明瞭ではない。可能性であるが、これらの結果は、正馬様用地内の断層上盤側の土岐花崗岩体に関しては、少なくとも MIU-1 号孔よりも月吉断層に近い深度 1000m までの領域において、断層形成時の力学的ダメージが岩体の岩石マトリックスへ及んでいることを示唆しているとも考えられる。

2)原位置岩盤物性と室内試験結果との比較

図 6.1.3 に岩石コアで測定した P 波速度の深度分布と原位置で実施した P 波検層結果を示す。同図から MIU-1 号孔の速度検層結果は、コア試験で得られた P 波速度分布よりも 0.5km/s 程度低くなるような傾向があるように見える。現在データの見直しを行っているが、現時点では横並びの評価は現時点では困難であるため、以下の考察は定性的に行うこととする。

コアで測定された弾性波速度(P 波速度)の分布傾向及び原位置での P 波速度の深度分布傾向を比較すると、原位置測定結果では局所的には割れ目の影響を受け弾性波速度の低下が著しい部分があるが、地表~地下 1000m までの定性的な変化の傾向は岩石コアで計測したそれと類似している。この結果から、岩石コアの室内試験結果から推定した月吉断層上盤側の岩体 (MIU-1 号孔の全域および MIU-2 号孔の深度 890m 地点まで) のゾーニング (地表~深度 200m、200~400m、400m より深い部分) は、原位置岩盤の力学的な物性区分を考える際にも適用できるものと判断される。

原位置での測定結果は、原位置岩盤内に存在する割れ目の影響を反映していることから、一般にはコアの弾性波速度よりも遅くなると考えられる。MIU-2 号孔の深度 700~800m 程度の区間は、月吉断層本体上部の断層に伴って形成された地質的なダメージゾーンであることが推定されているが、図 6.1.3 から同領域で P 波速度が不連続的に低下しておりダメージゾーンの存在を肯定する結果となっている。

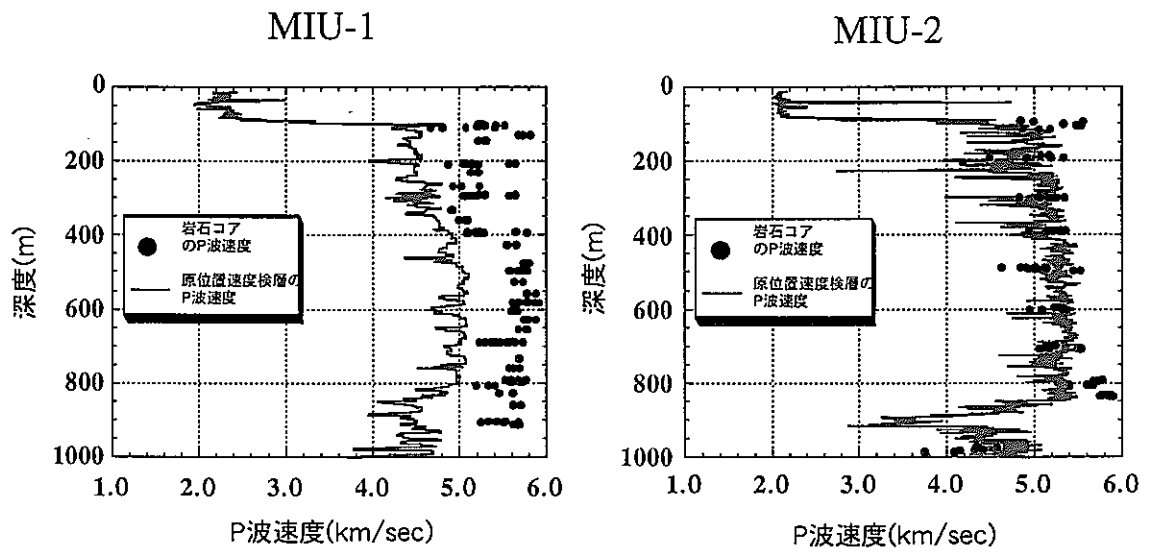


図 6.1.3 室内試験および孔内検層より得られた P 波速度の深度変化

(● : 室内試験結果、赤実線 : 速度検層結果)

3)岩体中の初期応力状態

図 6.1.4 は、AN-1 号孔及び MIU-2 号孔で実施した水圧破碎法による初期応力測定結果の比較を示したものである。実線は、応力値や最大主応力の方向がその上下において完全に不連続になっていると判断される深度を示している。

測定された主応力値に関して比較すると、地形条件が大きく異ならないにもかかわらず主応力値の分布傾向は異なる。具体的には、地表～深度 300m の領域と深度 600,700m より深い部分（月吉断層上盤側）に関しては AN-1 号孔では主応力値が深度増加に伴い増加するような傾向があり、一般的な傾向と変わらないが、MIU-2 号孔ではほとんど主応力値の深度変化がないことが特徴的である。それらの中間領域(深度 300～600m 程度)は、AN-1,MIU-2 号孔とも分布傾向は類似しているが、この領域内で測定した最大値と最小値の差が MIU-2 では大きくなっている。主応力方向については、AN-1 号孔の結果では深度 300m で 45 度程度の主応力の回転が見られるのみであるのに対して、MIU-2 号孔では地表～深度 400m と 400～700m の領域で、深度増加に伴い NS→NWW-SEE 方向への主応力の回転がそれぞれ認められる。MIU-2 の深度 700m 以深の最大主応力方向は複雑に変化している。NWW-SEE 方向は本調査対象領域の広域応力場の最大圧縮軸方向(NW-SE 方向)とほぼ一致している(図 6.1.5⁶⁾)。以上の AN-1 号孔と MIU-2 号孔の測定結果の差異は、断層の存在がその周辺の応力場に大きな影響を与えている可能性を示唆するものと考えられる。

一方、両孔の測定結果に共通することは、主応力値及び最大主応力方向についても深度方向に不連続な分布を示しているということであり、正馬様用地内の月吉断層上盤側の岩体内では Stress decoupling が生じているといえる。図 6.1.6 に結晶質岩中に掘削された海外の地下研究施設において実施された応力測定の実例を示す⁷⁾が、同地点においても、地質学的に割れ目帯と評価されている場所において、応力値や主応力方向が不連続になる傾向が認められている。この結果と AN-1 号孔及び MIU-2 号孔における測定結果を比較して考えた場合、MIU サイト内の岩体中に月吉断層部以外にも Stress decoupling を生じさせる地質学的な不連続構造が存在する可能性が高いことが推察される。

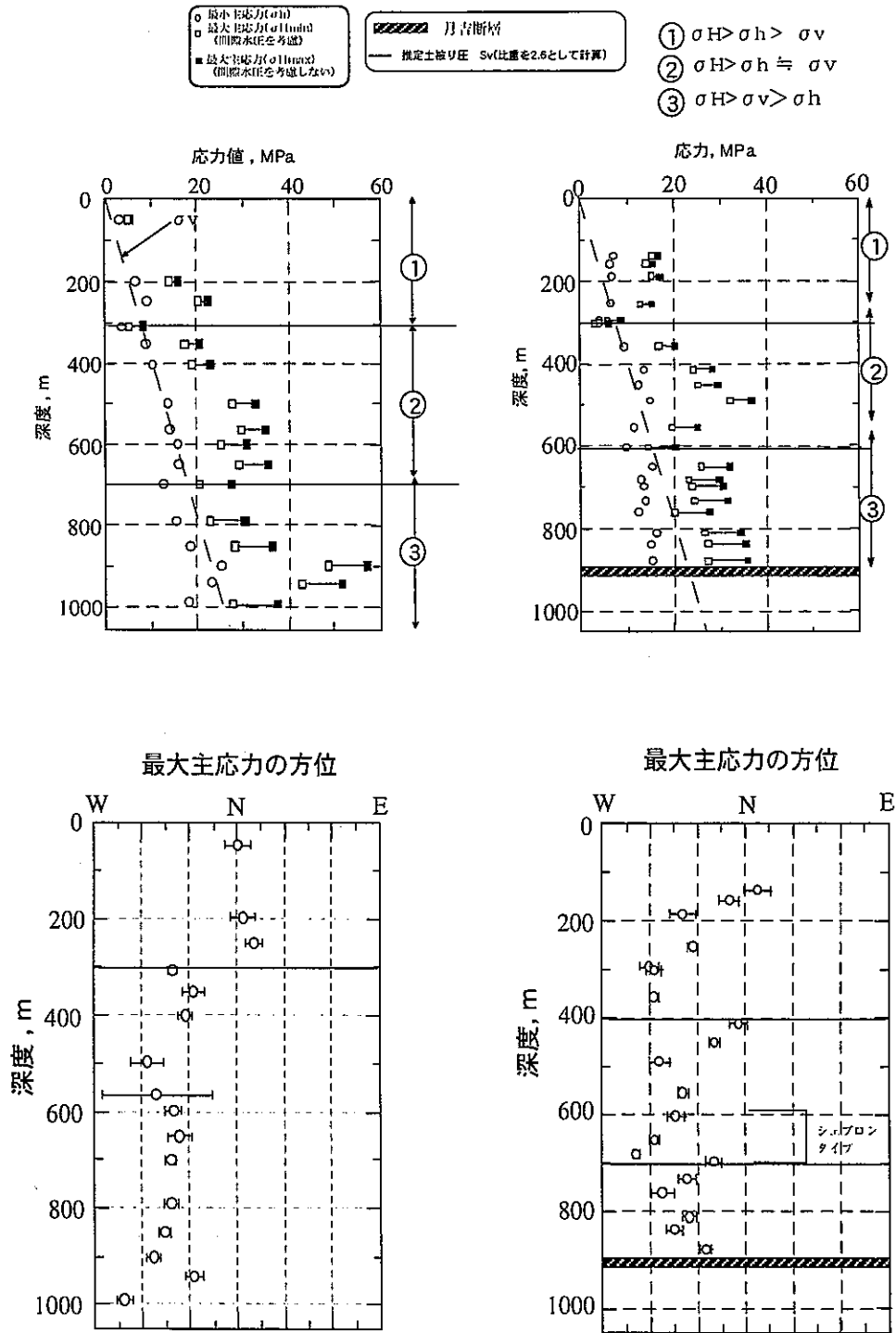


図 6.1.4 AN-1 及び MIU-2 号孔における水圧破碎法による応力測定結果の比較
(上図：主応力値、下図：主応力方向、左側：AN-1 孔、右側：MIU-2 孔)

東濃鉦山周辺の広域的な応力場 「日本の地殻水平ひずみ（1883-1985年）」

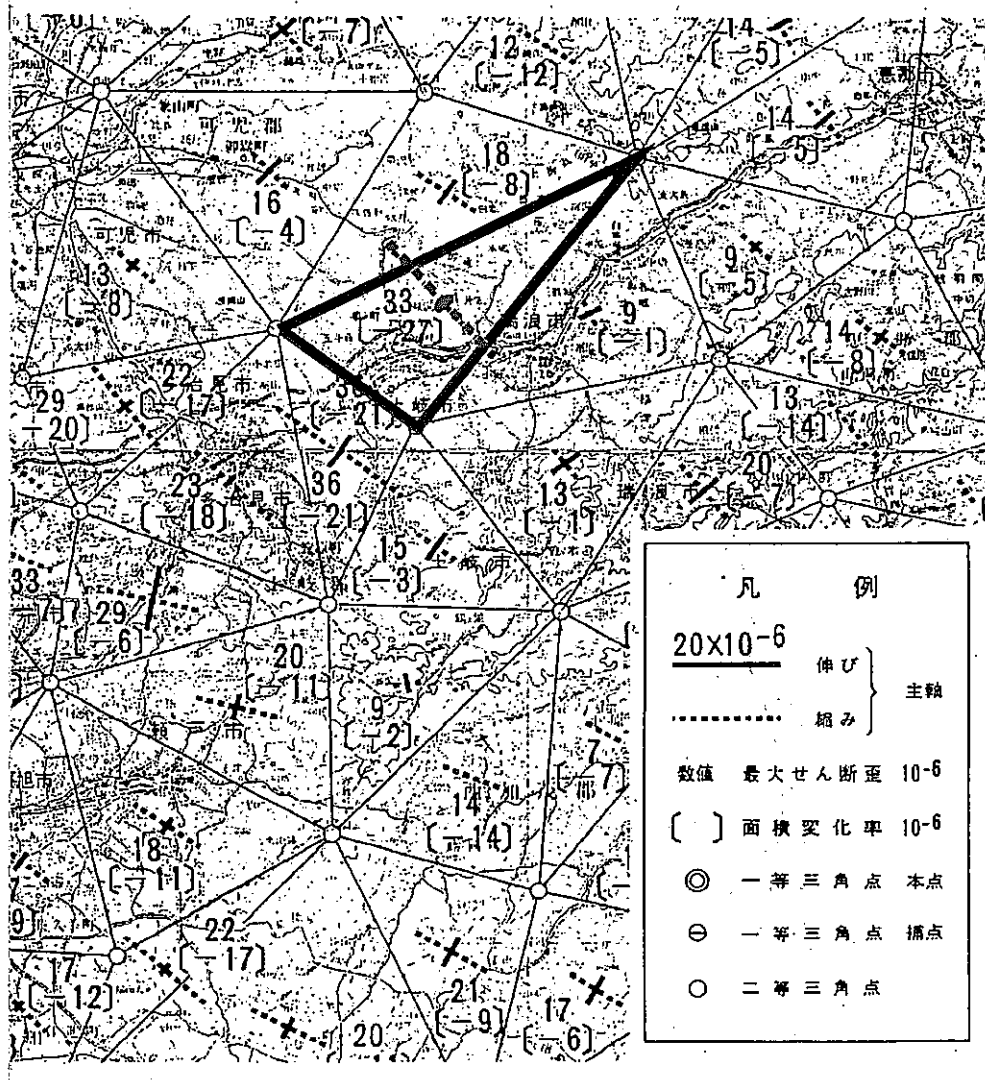
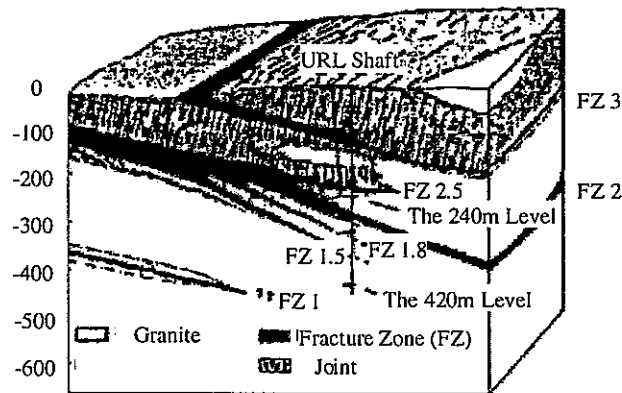
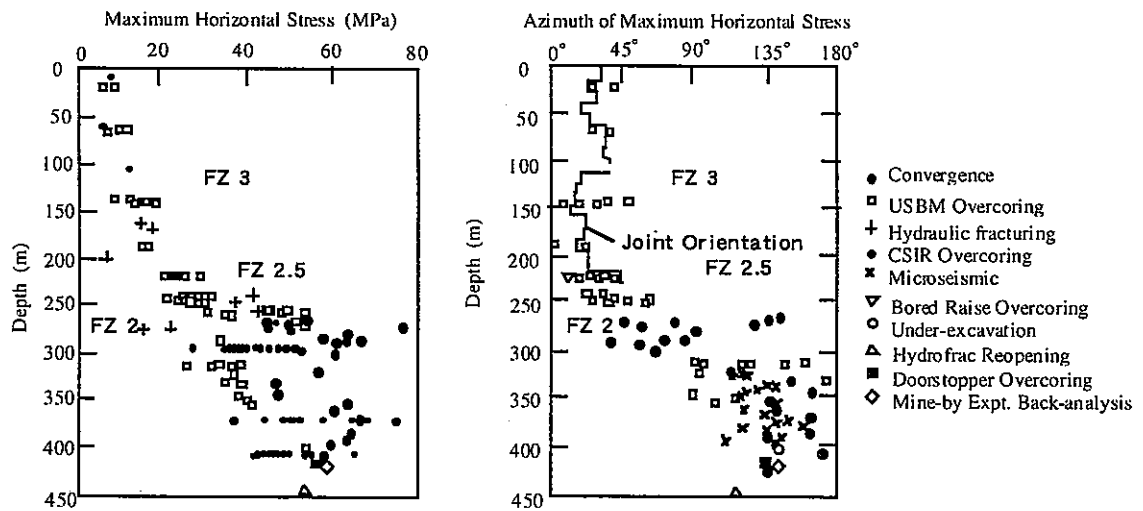


図 6.1.5 MIU サイト周辺領域の水平地殻ひずみ分布⁶⁾



Cross-section of geology at the URL site.



Maximum stress magnitudes and directions from various techniques employed at the URL

図 6.1.6 カナダ URL にて実施された各種応力測定結果の比較⁷⁾

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 AN-1 号孔、MIU-1 号孔及び MIU-2 号孔において実施した BTV 観察結果に基づく割れ目数およびその卓越方向の深度変化を示す。割れ目本数については、MIU-1 号孔までの結果では地表～300m 程度までと 800m より深い所で相対的に割れ目の数が多くなっており、その中間領域では割れ目本数が少ない傾向を示していた。MIU-2 号孔でもこの傾向とほぼ同様の傾向が見られ、地表～400m 程度までと深度 700m 以深では相対的に割れ目数が多くその中間領域では割れ目が少ない傾向を示している。もう一つの特徴として、上下の割れ目頻度が相対的に多かったゾーンを比較すると、AN-1 号孔から MIU-2 号孔に向かうにつれて、すなわち月吉断層に近づくにつれてそれらのゾーンでの割れ目数が相対的に増加しているように見える。この傾向は特に深部のゾーンで顕著である。

一方、割れ目の卓越方向に関しては、MIU-1 号孔までの結果では、深度 300m までは水平方向の割れ目が多くそれ以深では相対的に高傾斜の割れ目が卓越する傾向を示していた。MIU-2 号孔における調査結果に関しても、深度 400m 程度まではやはり水平に近い傾斜を有する割れ目が多くなっており、これまでの調査結果と調和的である。しかし、MIU-2 号孔ではこれまで水平方向の割れ目があまり観察されていない深度 700m 以深から水平方向の割れ目が再び卓越するような傾向を示す。

図 6.2.2 は、原位置の割れ目頻度分布と室内及び原位置で計測された P 波速度の分布を比較したものであるが、同図から割れ目本数やその深度変化は、AN-1,MIU-1 及び MIU-2 号孔での調査により得られた岩石物性の分布等から推定されるゾーニングと矛盾しないと判断される。また、割れ目数の粗密が認められる領域と、原位置での水圧破碎法により得られた深度方向の主応力値及び最大主応力方向の分布特性が異なる領域は良く対応している。以上の結果から、正馬様用地内の土岐花崗岩上盤部の岩体は、深度 1000m までの範囲で、おおよそ 3 つの地質学的・力学的に異なる性質を有するゾーンに区分できると判断できる。

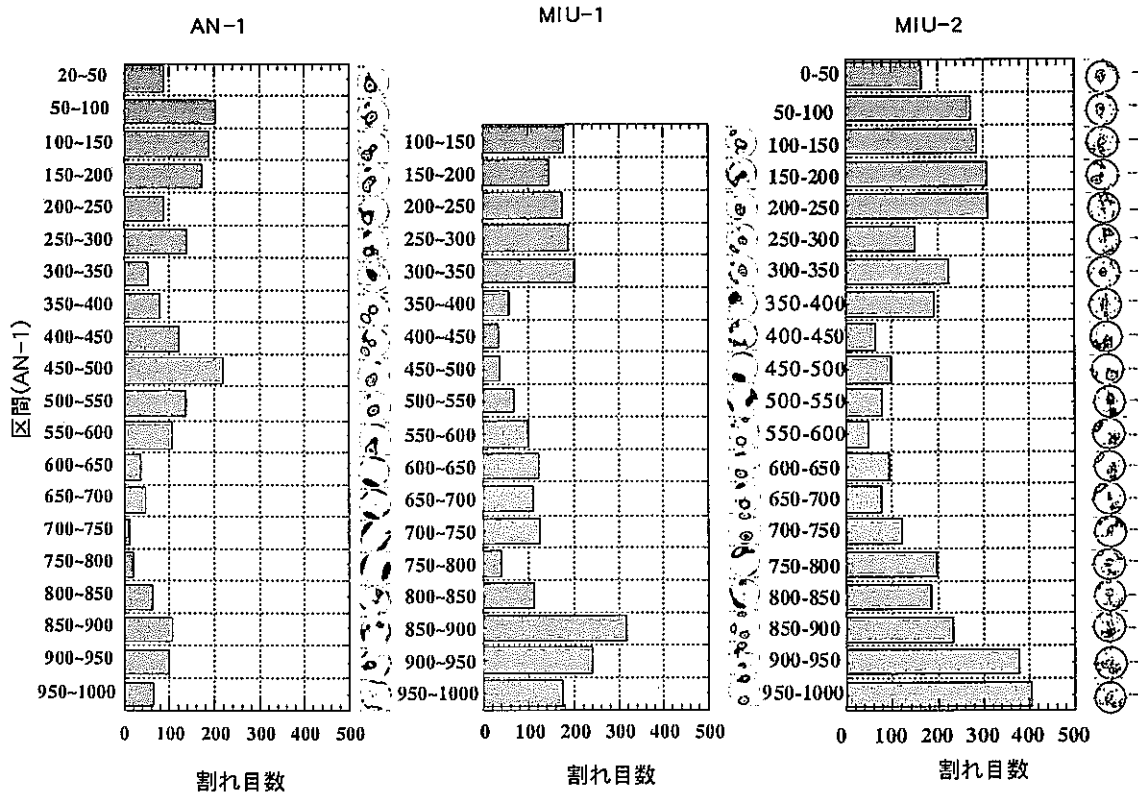


図 6.2.1 AN-1,MIU-1 及び MIU-2 号孔における割れ目調査結果

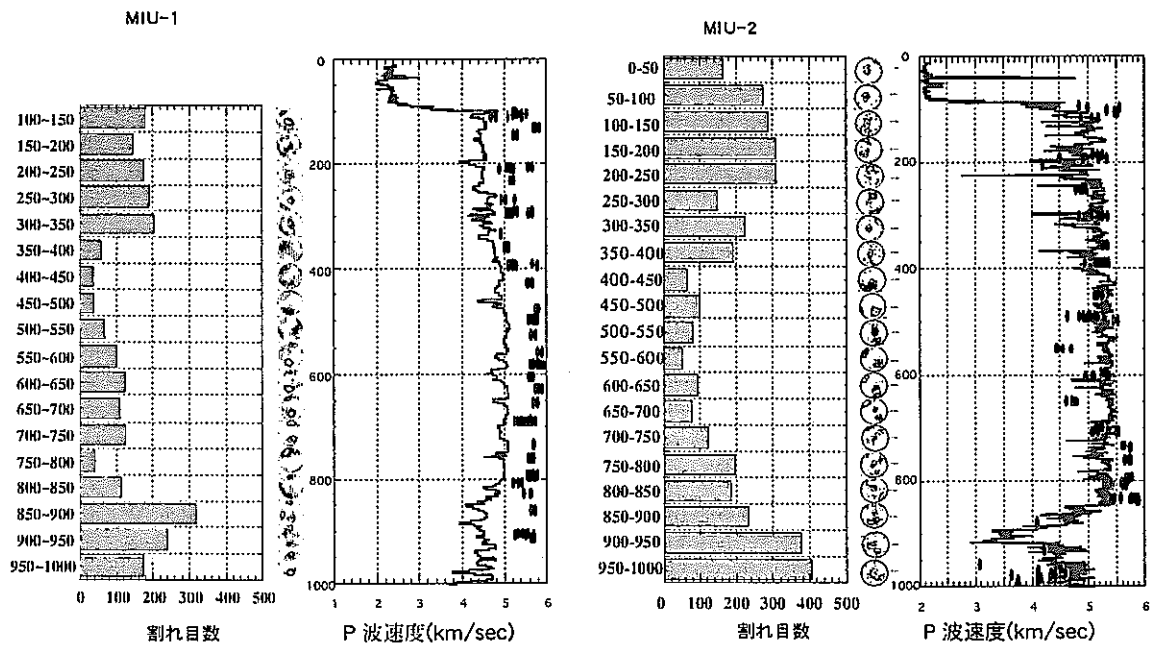


図 6.2.2 BTV 観察より得られた割れ目頻度分布と室内及び原位置弾性波測定結果との比較

6.3 月吉断層上盤側の土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル

AN-1,MIU-1 および MIU-2 号孔の3つの 1000m 試錐孔を用いた調査によって、少なくとも正馬様用地内の土岐花崗岩体（断層上盤側）については、深度 1000m までの範囲で、おおむね3つの地質学的・力学的に異なる性質を有するゾーンに区分可能であることがわかってきた。

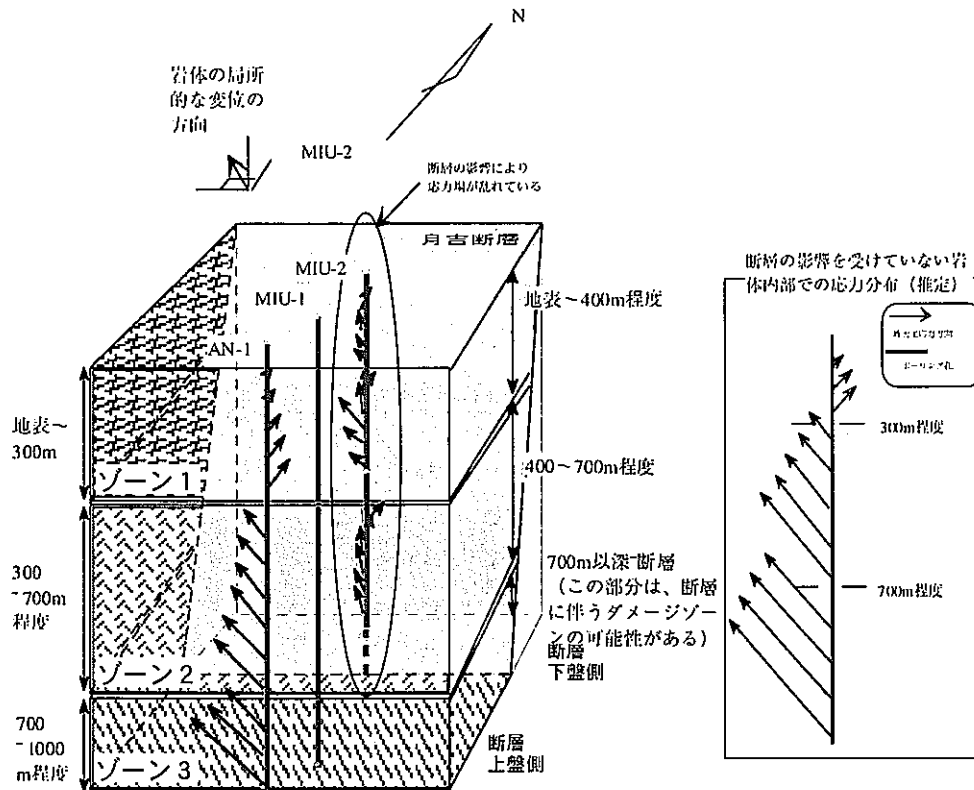
上記の結論と、これまで得られた各種物性値の深度分布や初期応力測定結果から、正馬様用地内の土岐花崗岩体（断層上盤側）の岩盤力学的な概念モデルを示したものが図 6.3.1 である。なお、このモデルは以下のような仮定に基づき構築している。

- ・ 原位置岩盤の P 波速度分布は MIU-2 号孔で観測された断層上盤側のダメージゾーン（深度 700 以深～895m 程度）以外は基本的に室内物性試験の結果と大きく変わらない。また、室内力学試験はポイントデータであり、概略の物性値分布を知ることはできるが、境界を定めるには連続的に計測されたデータを用いるのが望ましいと考えられる。このため、本概念モデル上のゾーニングでは、主として原位置で計測された P 波速度の変化に着目する。
- ・ MIU-2 号孔における初期応力値の深度分布は複雑であるが、それは断層の影響を受けていると判断し、ゾーニングでは割れ目の鉛直方向の分布特性の変化や原位置岩盤の深度方向の P 波速度検層結果と良く対応している主応力方向の変化に着目する。
- ・ 断層から離れた地点（ここでは、AN-1 号孔）の初期応力値は、深度 300m 以深の最大主応力方向がほぼ NW-SE 方向であり広域的な圧縮応力軸と一致することから、断層の影響がほとんど及んでいないと仮定する。
- ・ AN-1 号孔の BTV 観察結果でも、深度方向の割れ目数の変化傾向は MIU-1,MIU-2 号孔と同じであるため、岩体内の構造（ゾーニング）自体は、AN-1 号孔～MIU-2 号孔の位置まで水平方向には連続的に延長する。ただし、単純化のため、断層から離れた地点の応力値は、それぞれのゾーン毎に深度とともに線形的に増加すると仮定する。

この概念モデルは、各ゾーン毎にプレート運動によって発生する広域応力場により、断層上盤側の岩体が月吉断層のような大規模不連続構造部に斜めに押しつけられ、断層沿いに岩体が押し上げられる変形が生じているモードをイメージしている。

このようなモデルを考えると、断層下盤側で、鉛直方向の応力成分が土被り方向の応力よりも小さいことやゾーン毎に主応力方向が回転している現象も定性的に説明しうる可能

性がある。この仮説は、MIU-3 孔において断層下盤側の応力状態を把握することにより、間接的にその妥当性を確認できる。直接的な断層部を対象とした長期変位計測などによる直接的な検証は第2段階以降の課題となる。



	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目が多いゾーン (低角~水平) ・マトリックス部の剛性 小 ・マトリックス部の異方性 不明 	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目が少ないゾーン ・マトリックス部の剛性 大 ・マトリックス部の力学的異方性 大 	<ul style="list-style-type: none"> ・割れ目が多いゾーン (高傾斜) ・マトリックス部の剛性 小 ・マトリックス部の異方性 小

図 6.3.1 MIU サイトにおける岩盤力学的概念モデル (断層上盤側)

7.まとめ

本報告では、MIU-2 号孔における力学特性調査結果をとりまとめるとともに、その結果と既に実施した AN-1,MIU-1 号孔の同種の計測結果を比較・検討した。その概要を以下に示す。

- ・ MIU-2 号孔における室内物理・力学試験の結果から、鉛直方向に4つの異なる物性を有するゾーンが存在することが推定された。すなわち、地表～深度 400m 程度、400～600m 程度、600～900m 程度、900m 以深である。深度 900m 以深は、月吉断層形成時に生じた力学的ダメージにより物性値の変化が生じた可能性があると考えられる。岩石コアの2次元・3次元弾性波速度測定結果から、岩石マトリックス部に若干の力学的異方性（P 波速度の最大値と最小値で 5～10%程度の違い）が認められ、その変化傾向は深度 600m 地点で異なることがわかった。
- ・ MIU-2 号孔における初期応力測定の結果から、鉛直応力分布は月吉断層上盤側ではほぼ土被り圧に等しいと考えられる。しかし、水平面内の主応力値は、一般的な知見と異なり深度に伴い線形的に増加するような傾向は示さず、深度 300m 及び 600m 地点で極小値を取るような複雑な分布を示す。また、主応力方向についても、地表～深度 400m、深度 400～700m の間で、NS→NWW-SEE 方向に回転するような特異な変化を示す。
- ・ 既存の調査結果の比較(AN-1,MIU-1 号孔)より、正馬様用地内の月吉断層の上盤側の岩体は、深度方向に少なくとも3つの異なる地質学的・力学的特性を有するゾーンに区分できると考えられる。また、この結果と既存の応力測定結果などを総合的に検討し、正馬様用地内の月吉断層上盤側の岩体に関する岩盤力学的概念モデルを構築した。このモデルでは、地表～深度 1000m までの範囲で力学的特性が異なる3つのゾーンが積層し、広域的な応力により岩体が月吉断層のような大規模不連続面に押しつけられている状態を想定しており、定性的ではあるが月吉断層下盤部の鉛直方向の応力値の低下や MIU-2 号孔における主応力の回転傾向を説明できる可能性がある。

8. 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構(1999):Working Programme for MIU-4 Borehole Investigation , JNC TN7410 99-007
- 2) 核燃料サイクル開発機構(1999):MIU-2 号孔における試錐調査, JNC TJ 7440 99-018
- 3) 核燃料サイクル開発機構(1998):釜石原位置試験総括報告書, JNC TJ 7410 99-001 , I-25~I-30
- 4) 核燃料サイクル開発機構(1998):MIU-2 号孔における水圧破碎法による初期応力測定 JNC TJ 7440 98-003
- 5) 核燃料サイクル開発機構(1999):AN-1 号孔および MIU-1 号孔における力学特性調査結果, JNC TN7420 99-004
- 6) 国土地理院編(1990):日本の地殻水平ひずみ
- 7) Chadler N. A., Read R. S. and Martin, C. D.(1996):In-situ stress measurement for nuclear fuel waste repository design, Proc. 2nd North American Rock Mechanics Symposium, pp.929-936.
- 8) 小島隆、松木浩二 (1994) :低応力レベルにおける岩石のカイザー効果に関する基礎的研究、資源と素材 Vol.110 pp.435~440.
- 9) 核燃料サイクル開発機構(1999):パイプレータ震源による弾性波探査, JNC TJ7420 99-005

APPENDIX

土岐花崗岩を対象とした水圧破碎法による 初期応力測定信頼性に関する検討

MIU-2 号孔における水圧破碎による初期応力測定では、土岐花崗岩を対象として測定した結果（応力値並びに主応力方向）に関する信頼性の検討も行った。

水圧破碎法では、測定されたブレイクダウンプレッシャー(P_b)、リオープニングプレッシャー(P_r)、シャットインプレッシャー(P_s)および岩石の引張強度(T)を用い、岩盤を等方弾性体と仮定した場合の円孔周りの解析解から最大最小主応力を算定するとともに、鉛直応力が主応力方向の一つである場合には原位置に誘起される縦亀裂は最大主応力方向に形成されるという仮定により誘起された亀裂方位を測定することにより主応力の方向を決定している。水圧破碎法自体は、国内外で標準的に実施されている応力測定法であり、鉛直応力が主応力方向の一つであるという仮定は、場所によらず一般的に認知されているものである。また、水圧破碎区間に割れ目が認められないもしくは生成される縦亀裂が既存割れ目の影響を受けないような箇所を選ぶことにより、割れ目の存在が及ぼす測定結果の影響は最小にとどめらる。

しかしながら、原位置岩盤を構成する岩石は一般に異方性を有しており、等方弾性体を仮定した解析にはおのずと誤差が含まれる。その観点から、山口大学では岩石の異方性が測定結果に与える影響についての検討がなされている。今回は、その手法に基づき、土岐花崗岩を対象とした場合にそれが有する異方性が測定結果に与える影響について検討した。以下にその結果を示す。

1. 解析理論と解析モデル

岩石は通常直交 3 次元異方性を有する場合が多いが、鉛直方向が主応力の一つと仮定できるのと同様に異方性の主軸の一つであるという仮定もまた一般に許容される。このため、ここでは、異方性の主軸の一つが鉛直方向であると仮定し、2次元面内の異方性が測定結果に与える影響に関して考察する。

1) 2次元異方弾性体を仮定し円孔に内圧が作用した場合の円孔周りの応力分布に関する解析モデル

円孔内の孔壁に内圧 Q が均一に作用するとき、 y 軸から θ をなす直線と孔壁との交点に生じる接線応力 σ_θ は、 E_y を y 軸方向の弾性係数、 E_θ を y 軸と θ をなす直線と孔壁との交点における接線方向の弾性係数とすると次式で与えられる。

$$\sigma_\theta = Q \cdot \left[-k + n(\sin^2 \theta + k \cos^2 \theta) + (1 + \mu_1^2)(1 + \mu_2^2) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \frac{E_\theta}{E_y}$$

ただし、 μ_1, μ_2, k, n は弾性係数と以下の関係を持つ。

$$\mu_1^2 + \mu_2^2 = 2\nu_{yz} - \frac{E_y}{G_{yz}}$$

$$k = -\mu_1\mu_2 = \left(\frac{E_y}{E_z}\right)^{1/2}$$

$$n = \left[2\left(\frac{E_y}{E_z} - \nu_{yz}\right) - \frac{E_y}{G_{yz}}\right]^{1/2}$$

ここで、

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\sin^4 \theta}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{yz}} - \frac{2\nu_{yz}}{E_y}\right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_z}$$

2) 2次元異方弾性体を仮定し円孔に内圧が作用した場合の円孔周りの応力分布に関する解析モデル

y 軸から角度 ψ だけ傾いた方向から圧縮応力 S_H が作用する場合、 y 軸から θ の位置に生じる接線応力 σ_{P1} は次式で与えられる。

$$\sigma_{p1} = S_h \{ n(1+n-\mu_1\mu_2) \sin \varphi \cos \varphi \sin \theta \cos \theta - [\cos^2 \varphi + (\mu_1\mu_2 - n) \sin^2 \varphi] \mu_1\mu_2 \cos^2 \theta - [(1+n) \cos^2 \varphi + \mu_1\mu_2 \sin^2 \varphi] \sin^2 \theta \} \frac{E_\theta}{E_y} \quad (1)$$

さらに、 P_1 と直交する方向に圧縮応力 σ_{sh} が作用するとき、 y 軸と θ をなる直線と孔壁との交点に生じる接線応力 σ_{P2} は次式のようなになる。

$$\sigma_{p2} = S_h \{ n(1+n-\mu_1\mu_2) \sin \varphi \cos \varphi \sin \theta \cos \theta - [\sin^2 \varphi + (\mu_1\mu_2 - n) \cos^2 \varphi] \mu_1\mu_2 \cos^2 \theta - [(1+n) \sin^2 \varphi + \mu_1\mu_2 \cos^2 \varphi] \sin^2 \theta \} \frac{E_\theta}{E_y} \quad (2)$$

ただし、 μ_1, μ_2, k, n は1)で示した弾性係数との関係を持つ。

3) 2次元異方弾性体を仮定した場合に水圧破砕時に生じる円孔周りの応力分布と破壊条件について

水圧破砕時には、1)、2)で示した応力変化が同時に生じることになる。弾性理論に基づくため、 S_H と S_h が同時に作用する2軸応力下では、接線応力 σ_p は式(1)と式(2)の重ね合わせとして表現できる。すなわち、

$$\sigma_p = \sigma_{p1} + \sigma_{p2}$$

通常の水圧破碎による応力測定の見方に従い、孔壁の接線応力と岩石の引張強度 S_t が等しくなった時に破壊が生じるものとする。すなわち、

$$\sigma_\theta + \sigma_p \geq S_t$$

実際の岩石では引張強度にも異方性があるので、その時は S_t を θ の関数として表すことによってその評価ができる。ただし、引張強度の異方性は亀裂が生じる方向の精度にほとんど影響しないことがわかっている。

本解析では、異方性の主軸と水平面内の主応力軸のなす角度 ψ をパラメータとして、弾性係数、水平面内の初期応力及び孔壁の引張強度が下表のような値をとるとき、式を満足する内圧 Q および亀裂の位置を求めた。なお、下表の弾性係数は、MIU-2 の 452.5m 地点より採取した岩石コアから作成した直法体を用いた一軸圧縮試験結果⁴⁾に基づき、弾性異方性が最も大きい軸応力ゼロのときの値を採用した。水平面内の初期応力の大きさは、水圧破碎試験の測定結果に基づいて深度 450m 付近の応力値を参考に求めた。また、岩石の引張強度 S_t は MIU-2 号孔から採取された岩石の力学試験結果を参考にした。

弾性率	初期応力	引張強度
$E_y = 41.8\text{GPa}$ $E_z = 25.3\text{GPa}$ $G_{yz} = 16.8\text{GPa}$ $\nu_{yz} = 0.137$	$S_H = 26\text{MPa}$ $S_h = 11\text{MPa}$	$S_t = 8\text{MPa}$

2. 解析結果

異方性の主軸 (y 軸) と水平面内の主応力軸とのなす角 ψ 、孔壁の接線応力が岩石の引張強度 S_t に達したときの内圧 Q 、 y 軸から計った破壊が生じる点の角度 θ などは表の通りである。なお、等方弾性体の場合は、引張破壊が生じる方向は水平面内の最大主応力の方向と一致するから ψ と θ は等しくなり、 $\psi - \theta$ はゼロである。また、等方弾性体の場合は、孔壁の引張応力が引張強度に達する時の内圧 Q は、ブレイクダウンプレッシャーに等しくなり 15.0MPa となる。

横軸に異方性の主軸と主応力軸のなす角 ψ 、縦軸に孔壁が引張破壊するときの内圧 Q (□印) 及び主応力軸の方向と破壊が生じる角度との差 $\psi - \theta$ (○印) をとると、図 5.4.1 のようになる。ここで、横軸に平行な点線は、岩盤を等方弾性体と仮定したときに孔壁に破壊が生じる内圧である。

まず、等方弾性体と異方弾性体で、破壊が生じる位置にどの程度の差が生じるかを検

討する。同図を見ると、 ψ が 0° 及び 90° のとき、言い換えると最大主応力の方向と異方性の主軸の方向が一致するとき $\psi - \theta$ はゼロとなり、破壊が生じる位置と最大主応力の方向は一致する。しかも、最大主応力の方向と等方面がほぼ垂直なとき($\psi = 90^\circ$)、土岐花崗岩で言えばマイクロクラックの配向面とほぼ垂直に最大応力が作用するとき、最も低い内圧で破壊が生じる。それ以外の角度では等方弾性解との間に差が生じる。 $\psi - \theta$ は、主応力軸と異方性の主軸のなす角が約 30° の時極大値をとり、その大きさは 8.3° である。これは、水圧破碎試験によって孔壁に誘起された亀裂の方位から等方弾性体の解に基づき水平面内の最大主応力の方位を決定する場合の誤差となる。しかし、インプレッションパッカーに写し取られる人工亀裂のうねりが、算定される縦亀裂の方位に $\pm 10^\circ$ 程度の与えることを考慮すると、工学的に許容される程度の誤差であると考えられる。

次に孔壁が引張破壊するときの内圧 Q についてみてみると、 ψ が $0 \sim 90^\circ$ まで変化するとき、 17.96MPa から 10.7MPa までほぼ単調に減少し、等方弾性解を仮定した時の $Q(15\text{MPa})$ の 72% から 120% の範囲で変化する。この差は無視できないほど大きいので、異方性岩盤の孔壁に亀裂が生じる時の圧力データに等方弾性解を適用して初期応力を計算した場合は、大

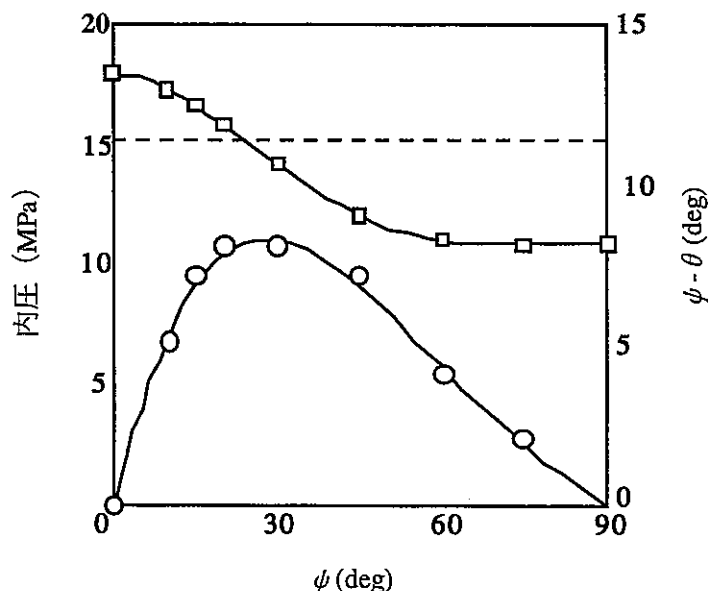


図 5.4.1 水圧破碎時に載荷する内圧 P と異方性の主軸と最大主応力軸のなす角度 (ψ, θ) との関係

きな誤差が含まれる可能性がある。しかし、通常の水圧破碎試験においては、孔壁が破壊するときの内圧 Q 、すなわち P_b (ブレイクダウンプレッシャー) は組織過敏性を有しているため初期応力の算定には用いない。一般には、いったん誘起された亀裂が孔壁において再開するときの圧力 P_r (Re-opening pressure) を採用することで、 P_b 及び岩石の引張強度を用いずに初期応力の大きさを算定する。従って、内圧 Q に関する誤差はあまり問題にならないと考えられる。

なお、本解析に用いたとき花崗岩の弾性係数は、大気圧下においての最も弾性異方性

の大きい無応力状態における値である。クラックの配向性により大気圧下で大きな異方性を示す土岐花崗岩も、地下深部では初期応力による扁平なクラックの閉塞により異方性は減少し、より等方的な性質になっていることが考えられる。その場合は、等方性の解に基づく誤差はさらに小さくなると思われる。

3. 結論

土岐花崗岩を対象とした場合の水圧破碎法による初期応力測定結果に関して、岩石の異方性が及ぼすの影響を、MIU-2 号孔の岩石コアで実施した物性試験結果から評価したパラメータを用い解析的に検討をした。その結果、水圧破碎法による応力測定結果に対する、土岐花崗岩が有する力学的異方性の影響は、工学的には問題にならない程度のものであることが明らかになった。