

DSCA法を用いた土岐花崗閃緑岩の 異方性に関する室内試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務)

平成12年2月

基礎地盤コンサルタンツ株式会社

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下さい。

〒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

DSCA法を用いた土岐花崗閃緑岩の異方性に関する室内試験

薛 自求*

要 旨

超深地層研究所建設予定地内に掘削された MIU-1 号孔と MIU-2 号孔のボーリングコアより採取した岩石試料に DSCA(Differential Strain Curve Analysis)法を適用し、得られた主ひずみの大きさ及びその方向を基に、試料内部のクラック異方性及びクラックの3次元分布特性について検討した。以下に主な知見を示す。

- (1) MIU-1 号孔と MIU-2 号孔では最大主ひずみと中間主ひずみがほぼ水平面に、最小主ひずみはほぼ鉛直方向にそれぞれ位置する。MIU-1 号孔では最大主ひずみの方向が、深度によって少し変動するが、NS 方向ないし NW-SE 方向となっている。
- (2) 各試料で得た3つの主ひずみ ϵ_{ii} の方向は、クラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向と概ね一致する。なお、主値 ν_{ii} の方向については、主ひずみ ϵ_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} に比べてばらつきが大きく、2次導関数の計算誤差による影響と考えられる。
- (3) 静水圧の負荷に伴って、最大主ひずみの方向が変動する試料があり、その変動幅は約30度であった。
- (4) 深度 509m を境に試料の crack porosity と低圧領域 (20MPa 以下) の弾性係数は、単調な増加と単調な減少をそれぞれ繰り返している。これは MIU-1 号孔と MIU-2 号孔が月吉断層に近接することに関係すると考えられる。
- (5) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線において、1つの明瞭な主値 ν_{ii} のピークを示す試料が多いため、試料内部に卓越するクラック系が存在すると考えられる。
- (6) DSCA 法で得られた主ひずみの方向が水圧破碎試験の結果とほぼ一致するため、地下応力測定法として有効性を確認することができた。

本報告書は、基礎地盤コンサルタンツ株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の結果である。

契約番号：11C0839

サイクル開発機構担当部署及び担当者：東濃地科学センター 地層科学研究グループ 松井裕哉

*：基礎地盤コンサルタンツ株式会社 岩盤工学センター

Experimental study on characterization of microcracks in Toki Granodiorite
using Differential Strain Curve Analysis

Ziqiu XUE*

ABSTRACT

DSCA (Differential Strain Curve Analysis) method was applied to rock samples collected from drillholes MIU-1 and MIU-2, and crack anisotropy of each sample was evaluated with magnitudes and directions of the three principal strains. Main results of the experimental study are concluded as following.

- (1) In boreholes MIU-1 and MIU-2, the maximum principal strain and intermediate principal strain are located in horizontal plane respectively, and the direction of the minimum principal strain is almost vertical.
- (2) In borehole MIU-1, the direction of the maximum principal strain is at NS direction or NW-SE direction, but it fluctuates by the depth a little.
- (3) The direction of the principal strain ε_{ii} agrees approximately with the direction of crack strain principal value ζ_{ii} in each sample. On the direction of principal value ν_{ii} , the dispersion is larger than the principal strain ε_{ii} and the crack strain principal value ζ_{ii} . It seems to be the effect by the computation error of second derivative.
- (4) During loading of the hydrostatic pressure, the fluctuation of the maximum principal strain direction was observed in some samples. The fluctuating range was about 30 degrees.
- (5) In boreholes MIU-1 and MIU-2, crack porosity and elastic modulus at the low-pressure range of rock samples increased discontinuously, and it seems to be the effect of the Tsukiyoshi fault.
- (6) The direction of the maximum principal strain agrees with the result of the stress measurement with hydraulic fracturing, and that the DSCA method is suitable for the in-situ stress measurement clarified.

This work was performed by Kiso-Jiban Consultants Co. Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Agreement No.: 2000-003

JNC Liaison: Hiroya Matsui, Geoscience Research Execution Group, Tono Geotechnical Center.

*: Rock Engineering Center, Kiso-Jiban Consultants Co. Ltd.

目 次

1. 試験目的	1
2. 試験方法	2
2.1 DSCA 法の概要	2
2.2 データ解析の方法	3
3. 試料の整形・準備	6
4. ひずみ測定の方法	7
5. 試験システム	8
6. 試験結果	9
6.1 静水圧とひずみの関係について	9
6.2 深度と主ひずみ方向の関係について	10
6.2.1 MIU-1 号孔の試料の試験結果	10
6.2.2 MIU-2 号孔の試料の試験結果	54
7. 考察	71
7.1 試料内部のクラックと深度の関係	71
7.2 主ひずみ方向の変動と DSCA 法の適用性	72
8. 結論	74
参考文献	76

付 表 目 次

表 3.1	DSCA 試験に用いた測定試料一覧表	6
表 5.1	DSCA 試験システムの構成	8
表 6.1	主ひずみ方向のクラックひずみ及び弾性係数	75

付 図 目 次

図 1.1	超深地層研究所建設予定地内に掘削された MIU-1 孔及び MIU-2 孔の位置図	1
図 2.1	応力解放に伴うクラック発生概念図	2
図 2.2	DSCA 試験で得られる静水圧～ひずみ曲線概念図	3
図 2.3	佐野教授が提案したギャップ法概念図	4
図 3.1	ボーリングコアより DSCA 試験用試料を切り出す方法	6
図 3.2	DSCA 試料におけるひずみゲージの配置パターン	7
図 5.1	DSCA 試験に用いた測定システムの概要	8
図 6.1.1	静水圧負荷時のひずみ増加の傾向を示す模式図	9
図 6.2.1	試料#1-1 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	11
図 6.2.2	試料#1-1 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	12
図 6.2.3	試料#1-1 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	13
図 6.2.4	試料#1-2 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	15
図 6.2.5	試料#1-2 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	16
図 6.2.6	試料#1-2 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	17
図 6.2.7	試料#1-3 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	19
図 6.2.8	試料#1-3 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	20
図 6.2.9	試料#1-3 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	21
図 6.2.10	試料#1-4 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	23
図 6.2.11	試料#1-4 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	24
図 6.2.12	試料#1-4 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	25
図 6.2.13	試料#1-5 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	27

図 6.2.14	試料#1-5 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	28
図 6.2.15	試料#1-5 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	29
図 6.2.16	試料#1-6 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	31
図 6.2.17	試料#1-6 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	32
図 6.2.18	試料#1-6 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	33
図 6.2.19	試料#1-7 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	35
図 6.2.20	試料#1-7 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	36
図 6.2.21	試料#1-7 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	37
図 6.2.22	試料#1-8 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	39
図 6.2.23	試料#1-8 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	40
図 6.2.24	試料#1-8 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	41
図 6.2.25	試料#1-9 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	43
図 6.2.26	試料#1-9 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	44
図 6.2.27	試料#1-9 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	45
図 6.2.28	試料#1-10 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	47
図 6.2.29	試料#1-10 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	48
図 6.2.30	試料#1-10 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	49
図 6.2.31	試料#1-11 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	51
図 6.2.32	試料#1-11 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	52
図 6.2.33	試料#1-11 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	53
図 6.2.34	試料#2-1 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	55
図 6.2.35	試料#2-1 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	56
図 6.2.36	試料#2-1 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	57
図 6.2.37	試料#2-2 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	59
図 6.2.38	試料#2-2 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	60
図 6.2.39	試料#2-2 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	61
図 6.2.40	試料#2-3 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	63
図 6.2.41	試料#2-3 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	64
図 6.2.42	試料#2-3 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	65
図 6.2.43	試料#2-4 の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向	67
図 6.2.44	試料#2-4 のクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向	68
図 6.2.45	試料#2-4 の主値 ν_{ii} の大きさとその方向	69

APPENDIX

APPENDIX 1	DSCA 試験で得られた各資料の静水圧～ひずみ曲線	A1-1
APPENDIX 2	ひずみ解析に用いた各資料の静水圧～ひずみ曲線	A2-1
APPENDIX 3	写真集	A3-1

1. 試験目的

DSCA(Differential Strain Curve Analysis)法では、静水圧下の岩石試料のひずみを測定することにより、試料に含まれるクラックを定量的に評価することができる。本業務では図 1.1 に示す超深地層研究所建設予定地内に掘削された MIU-1 号孔及び MIU-2 号孔のコアより採取した岩石試料に DSCA 法を適用し、得られた主ひずみの大きさ及びその方向を基に、岩石試料内部のクラックの異方性及びクラックの 3 次元分布特性と初期応力場との関係について検討することが主な目的である。

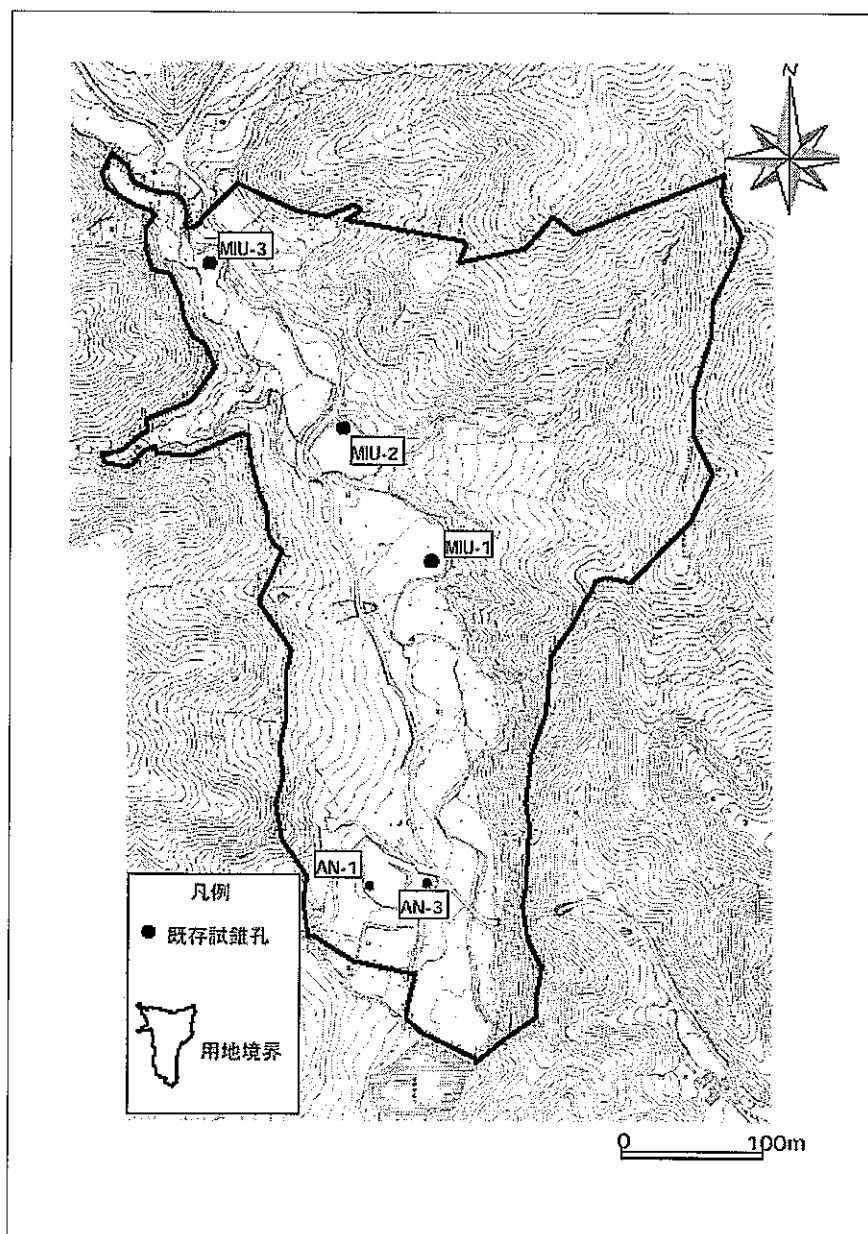


図 1.1 超深地層研究所建設予定地内に掘削された MIU-1 号孔及び MIU-2 号孔の位置図
DSCA 試験用の岩石試料は MIU-1 号孔及び MIU-2 号孔のボーリングコアより採取した。

2. 試験方法

2.1 DSCA 法の概要

Simmons et al.(1974)及び Siegfried and Simmons(1978)は、静水圧下における岩石試料のひずみを精密に測定できる DSA(Differential Strain Analysis)法を考案した。この試験法では静水圧下の岩石試料のひずみから同時に測定した比較試料の溶融石英（クラックを殆ど含まない）のひずみを差し引くことにより、 2×10^{-6} strain の精度でひずみを測定することが可能である。Strickland and Ren(1980)は DSA 法で得た高精度のひずみデータを解析し、地下応力の方向や応力の大きさの比を推定する DSCA(Differential Strain Curve Analysis)法を提案した。その後、DSCA 法を用いて、地下応力を推定する研究報告は数多くみられるようになった（例えば、Ren and Roegiers,1983; 佐野ら,1990）。

DSCA 法ではクラックの閉鎖によって生じるひずみを定量的に評価し、ひずみテンソルを基に地下応力を推定するが、岩石試料に含まれるクラックと地下応力との間では、以下のような仮定が成り立つことが前提となっている。

- (1) コアリングによって岩石にかかっていた地下応力が解放される際、ほぼ均一な大きさのクラックが主応力方向と直交するように発生し、クラック密度は地下応力の大きさに比例する（図 2.1 参照）。
- (2) 静水圧下で得た岩石のひずみについて、先在クラックや熱応力（地下と地上の温度差による）に起因するクラックの影響は、応力解放によって生じたクラックのと比べて無視できるほど小さい。
- (3) 地下深部において岩石は等方均質な弾性体とみなすことができる。

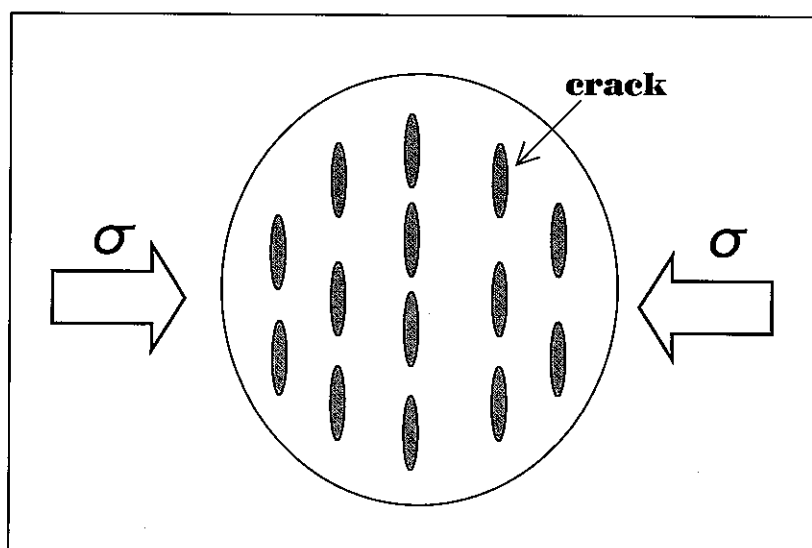


図 2.1 応力解放に伴うクラック発生概念図

コアリングによって地下で岩石にかかっていた応力 σ が解放されると、応力の方向と直交するようにクラックは発生する。

2.2 データ解析の方法

DSCA 試験では図 2.2 に示すような静水圧～ひずみ曲線が得られる。この静水圧～ひずみ曲線を解析する手法として、コンプライアンス法とギャップ法が提案されている。コンプライアンス法は Strickland and Ren (1980)によって提案された手法であり、図 2.2 において、低い静水圧領域の接線勾配 (θ) と高い静水圧領域の接線勾配 (β) との差 ($\theta - \beta$) を地下応力の解放に伴って発生したクラックが閉鎖するときに生じるひずみの大きさと考える。

一方、ギャップ法は Dey and Brown(1986)によって提案された手法であり、静水圧～ひずみ曲線の接線とひずみ軸との切片 (η_0) を地下応力の解放に伴って発生したクラックが閉鎖するときに生じるひずみの大きさと考える。

両解析手法について、これまでの研究報告は次のようなことを指摘している（例えば、及川ら,1995; 佐野,1994）。(1)コンプライアンス法では、接線勾配 θ と β を求める際の圧力範囲の設定が曖昧な点である。(2)ギャップ法ではひずみ測定の精度が十分に高くない場合、静水圧に対するひずみの1次及び2次の導関数を求める際の誤差である。

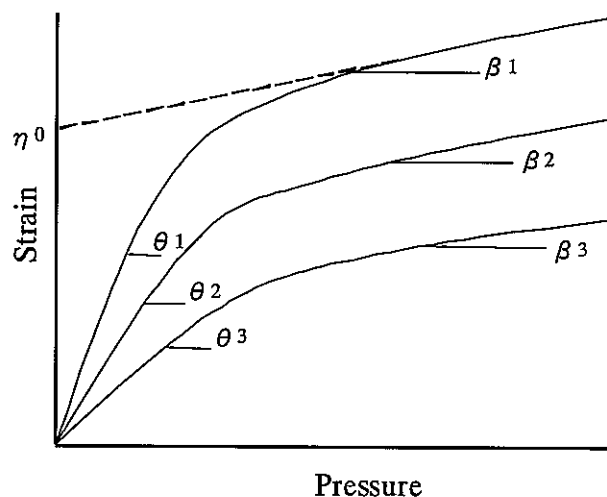


図 2.2 DSCA 試験で得られる静水圧～ひずみ曲線の概念図

θ_i と β_i はそれぞれ静水圧の低い領域と高い領域の接線勾配を示す ($i=1, 2, 3$)。

η_0 は静水圧～ひずみ曲線の接線とひずみ軸との切片である。

本業務では山口大学の佐野教授が提案したギャップ法を用いた（佐野,1994）。このギャップ法は Morlier(1971)及び Dey and Brown(1986)の考えを取り入れた新しいひずみ解析方法であり，その概要を図 2.3 に示す。

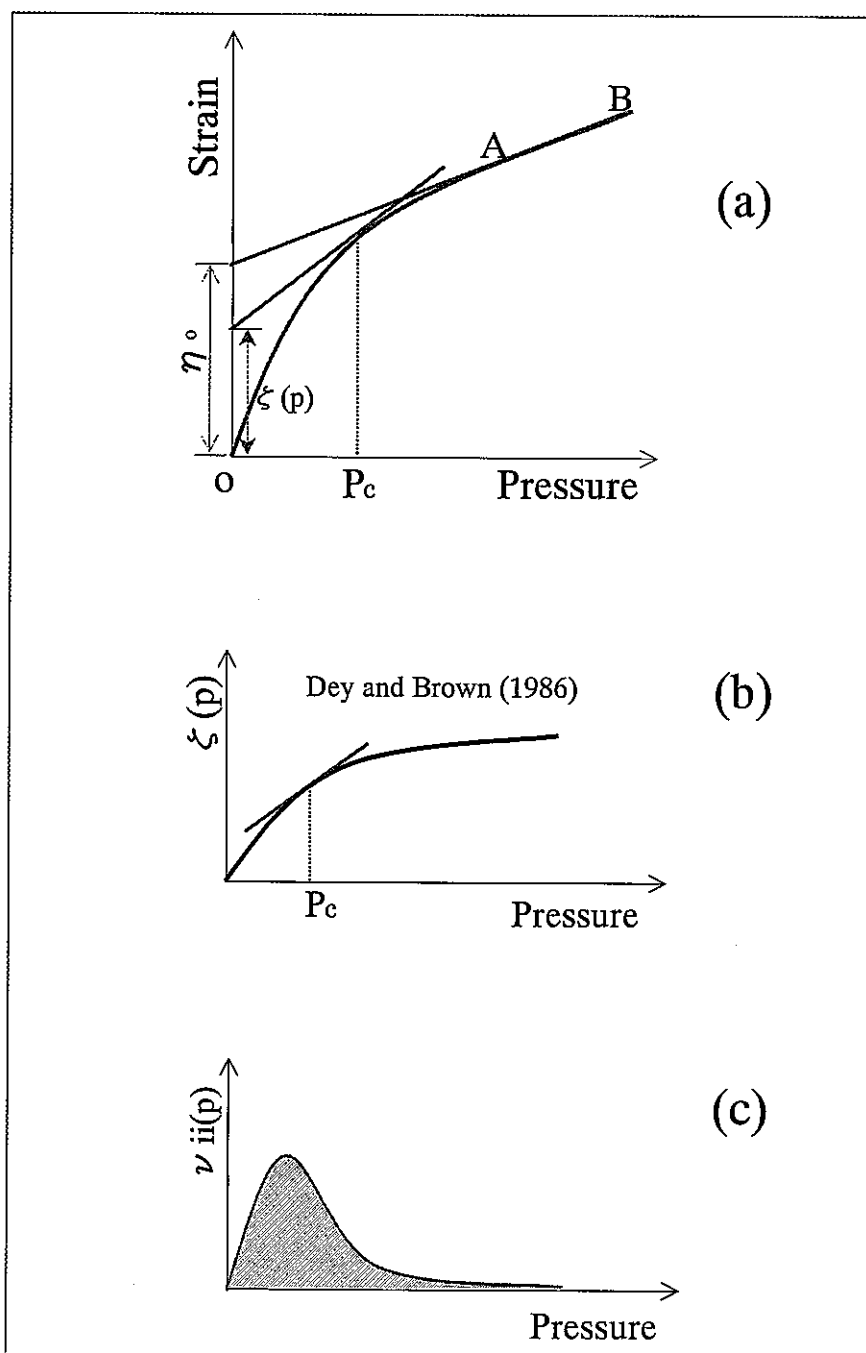


図 2.3 佐野教授が提案したギャップ法の概念図

- (a) 静水圧～ひずみ曲線，(b) 静水圧～クラックひずみ曲線，
 (c) 静水圧～ ν_{ii} 曲線 (ν_{ii} の値を正に表示， $ii=11,22,33$)

図 2.3(a)では、ひずみテンソル ε_{ij} の圧力 P における静水圧～ひずみ曲線の接線が ε 軸と交差するときの値 ζ_{ij} を求める。 ζ_{ij} は静水圧 P にいたるまでに完全に閉じたクラックによって生じたひずみである。

図 2.3(b)は静水圧～ ζ_{ij} 曲線を示しており、 ζ_{ij} を静水圧 P に対して微分すると、静水圧 $P \sim (P + dP)$ の間に閉じるクラックによるひずみ ν_{ij} を求めることができる。 ν_{ij} の主値を座標変換によって求めると、図 2.3(c)に示す静水圧～ ν_{ii} 曲線を得ることができる。

図 2.3(c)は DSCA 試験中に閉じたクラックのアスペクト比（クラックの短軸と長軸の長さの比）のヒストグラム分布を間接的に示している。この図において、横軸 P は閉じたクラックのアスペクト比を示しており、静水圧が大きいほどクラックのアスペクト比は大きい。また、縦軸 ν_{ii} の大きさは閉じたクラックの個数を表わしている。

上述のように、静水圧下のひずみの圧力に関する導関数を求めることにより、岩石試料に含まれるクラックのアスペクト比の分布やクラック方位分布を知ることができる。

$$\zeta_{ij}(P) = P (d\varepsilon_{ij}/dP) - \varepsilon_{ij}$$

$$\nu_{ij}(P) = d\zeta_{ij}/dP$$

ここでは、

P : 静水圧

ε_{ij} : クラックを含む岩石試料のひずみテンソル

ζ_{ij} : $P \leq P_c$ において完全に閉じるクラックによるひずみ

ν_{ij} : P_c と $P_c + dP_c$ 間で閉じるクラックによるひずみ

となっている。

従来のギャップ法では、 ζ_{ij} (あるいは η_{ij}) が用いられているが、これらは圧力 P 以下で閉じたすべてのクラックを反映している。佐野教授が提案したギャップ法は、ある圧力範囲で閉じたクラックのみを対象とする主値 ν_{ii} を求めることより、複数のクラック系を分離することが可能と考えられている。

3. 試料の整形及び準備

採取したボーリングコア（φ66mm）について、まず水平及び鉛直方向にそれぞれ面出しを行い、立方体の試料に整形した。試料の大きさはひずみ測定に端面の影響が出ないように、立方体の一辺の長さを44mmとした。次に立方体試料の各面を#2000の研磨剤で仕上げた。DSCA試験に用いた測定試料のボーリング孔や採取深度などを表3.1に示す。

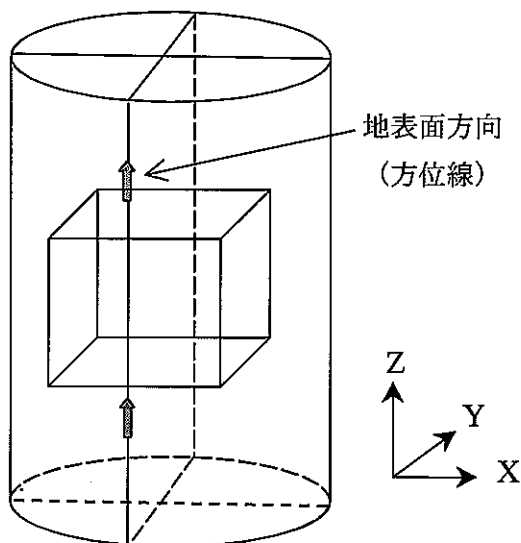


図 3.1 ボーリングコアより DSCA 試験用試料を切り出す方法

表 3.1 DSCA 試験に用いた測定試料一覧表

試料番号	ボーリング孔	コア深度 (m)	矢印方位
#1-1	MIU-1	192.1-192.8	N28W
#1-2	"	292.6-293.0	N19E
#1-3	"	413.0-413.9	N41W
#1-4	"	509.5-510.0	N84E
#1-5	"	582.2-582.8	N29E
#1-6	"	586.4-587.0	N 6W
#1-7	"	677.0-677.9	N49E
#1-8	"	751.4-752.0	N19E
#1-9	"	802.0-802.9	N70W
#1-10	"	927.0-927.7	N 8W
#1-11	"	987.3-988.0	N 7E
#2-1	MIU-2	768.3-768.6	-----
#2-2	"	827.0-828.0	-----
#2-3	"	856.7-857.0	-----
#2-4	"	967.1-967.3	-----

試料内部のクラック分布の不均質性を考慮して、ひずみゲージはゲージ長 10mm のものを用いた。ひずみの測定は、図 3.2 に示すように立方体各面に異なる 4 方向で行った。このため、一個の測定試料より計 24 チャンネルのひずみデータを得ることができた。また、ひずみゲージの貼り付けでは、試料表面を洗浄した後、流動性を高めるためあらかじめ暖めた 12 時間硬化型のエポキシ樹脂を使用し、硬化するまで 0.2MPa の圧力を加えて 12 時間圧着させるようにした。静水圧試験時の封圧媒体である油が試料内部に浸透することを防ぐために、ひずみゲージを貼り付けた後、試料の各面をシリコンゴムで被覆した。

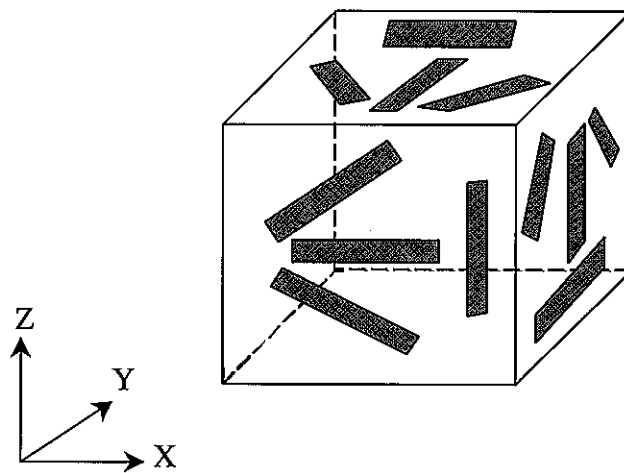


図 3.2 DSCA 試料におけるひずみゲージの配置パターン
各面において 4 枚のゲージのうち、3 枚はロゼット方式に配置している。

4. ひずみ測定の方法

静水圧を常圧から最高圧 150MPa まで負荷した。負荷ステップは、0~10MPa までは 1MPa ずつ、10MPa~40MPa までは 2.5MPa ずつ、40MPa~100MPa までは 5MPa ずつ、100MPa~150MPa までは 10MPa ずつとした。静水圧を負荷した後、1 分毎にひずみをモニターし、すべてのひずみゲージの値に変化がなくなったことを確認してから次のステップへ移行した。室温の変化がひずみ測定に影響を及ぼさないように、試験中エアコンを作動させ、室内の温度を一定に保つように努めた。

5. 試験システム

DSCA 試験システムの構成は表 5.1 に示すとおりであり、図 5.1 に測定システムの概要を示す。

表 5.1 DSCA 試験システムの構成

	品名	仕様		
計測	圧力容器	最高圧力 200MPa	φ 150mm x H500mm	材質 SNCM-439
	高圧ハンドポンプ	最高圧力 200MPa	吐出容量 0.7~20cc	保持精度 0.5kgf/cm ²
	ハイゼ圧力計	最高目盛 250MPa	測定精度 0.2kgf/cm ²	寸法 φ 300mm
解析	解析パソコン	DESKPRO 5100	DOS/V	コンパクト
	データロガー	TDS 302+延長ボックス	最大チャンネル数 40	東京測器
	ひずみゲージ	FLA-10-11-005E	ゲージ長 10mm	東京測器

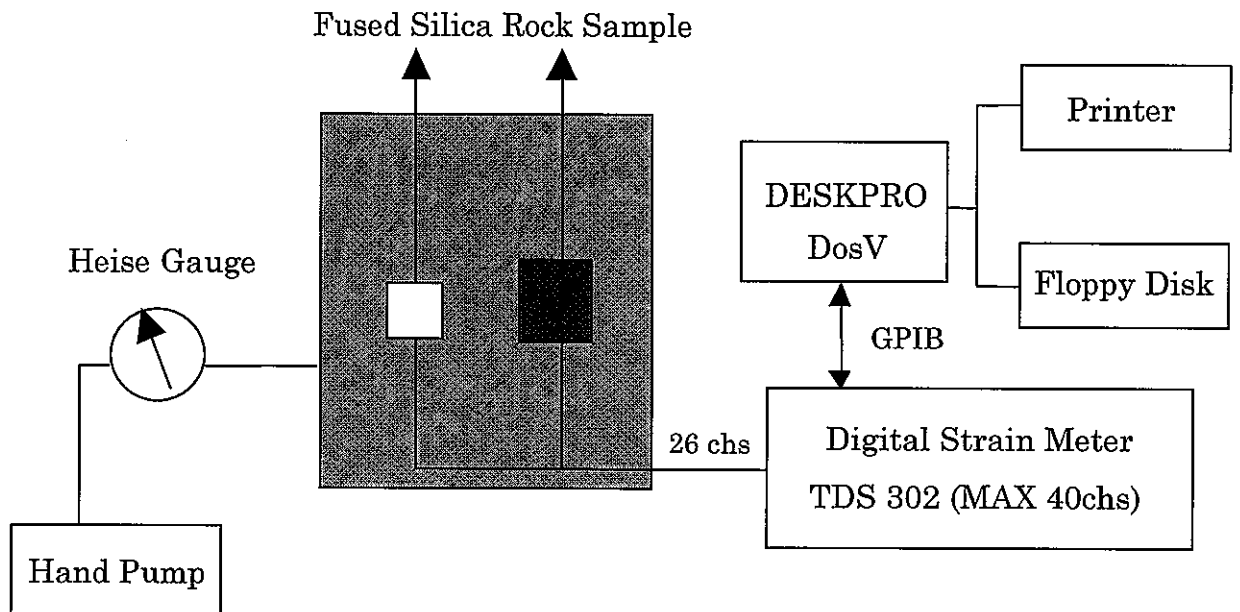


図 5.1 DSCA 試験に用いた測定システムの概要

6. 試験結果

6.1 静水圧とひずみの関係について

DSCA 試験で得た各試料表面に貼り付けた計 24 枚のひずみゲージの結果を *APPENDIX 1* に示す。静水圧を徐々に負荷していく過程で、断線や不安定な値が認められたゲージのデータは解析から除外され、各試料表面の同一方向にあるゲージのひずみより平均値を求めている。*APPENDIX 2* にひずみ解析に用いた各試料の静水圧～ひずみ曲線を示す。

APPENDIX 2 に示した各試料の静水圧～ひずみ曲線を見ると、静水圧の負荷に伴うひずみの増加傾向に、次のような共通点が認められる。図 6.1.1 は静水圧負荷時のひずみ増加の傾向を示す模式図である。

- ①静水圧 20MPa までは、圧力の増加に伴ってひずみの増加が著しい。
- ②静水圧 20MPa から 40MPa までの間では、ひずみの増加が緩やかになる。
- ③静水圧 40MPa 以降では、ひずみがある傾きをもつ直線に沿って増加する。

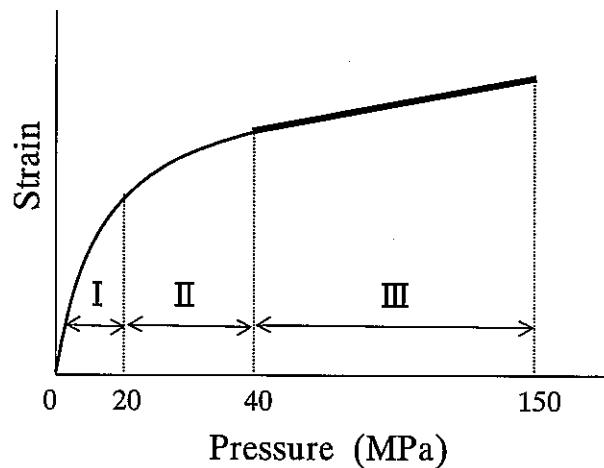


図 6.1.1 静水圧負荷時のひずみ増加の傾向を示す模式図

静水圧の負荷に伴ってひずみは、圧力範囲Ⅰでは急激に増加するが、圧力範囲Ⅱではひずみの増加傾向が緩やかになる。圧力範囲Ⅲではひずみがほぼ線形的に増加する。

6.2 深度と主ひずみ方向の関係について

以下ではボーリング孔別・深度順に、ひずみ解析で得た各試料の主ひずみ ε_{ii} 、クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及び単位圧力あたりのクラックひずみ主値 ν_{ii} (以下では主値 ν_{ii} と呼ぶ) の大きさとその方向について述べる。なお、 ii はそれぞれ3つの主値 11,22,33 を表わす。各試料の crack porosity は、3つの主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) の総和である。

MIU-1 号孔の試料#1-1~#1-11 については、ボアホールテレビの画像を基に方位が特定できたため、主ひずみやクラックひずみ主値の方向を定方位に修正してステレオネットの上半球にプロットした。一方、方位不明な MIU-2 号孔の試料#2-1~#2-4 については、仮方位のまま主ひずみやクラックひずみ主値の方向をステレオネットの上半球にプロットした。

6.2.1 MIU-1 号孔の試料の試験結果

◎ 試料 #1-1(192.1m - 192.8m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} 、クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.1~図 6.2.3 に示した。図 6.2.1(a)では3つの主ひずみのうち、最大主ひずみ (○) が中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) に比べて約 34% 大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は、それぞれ $412\mu\text{strain}$ 、 $209\mu\text{strain}$ 及び $117\mu\text{strain}$ となっており、最大主ひずみ方向のクラックひずみが最も大きかった。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $738\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.1(b)の主ひずみ方向をみると、最大主ひずみと中間主ひずみはほぼ水平面に、最小主ひずみは鉛直方向にそれぞれ位置することがわかる。また、最大主ひずみの方向はほぼ NS 方向であり、静水圧負荷に伴う各主ひずみ方向の変動は殆どみられなかった。

図 6.2.2 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では静水圧の負荷に伴う主値 ζ_{ii} の増加は小さいが、静水圧が 150MPa に達したときの ζ_{11} の値はそれぞれ ζ_{22} の約 2 倍、 ζ_{33} の約 4 倍となっている。また、主値 ζ_{ii} の方向については、少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.3 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.3(a)では静水圧 20MPa に ν_{11} の明瞭なピークを確認することができる。このほか、静水圧 9MPa でも ν_{11} と ν_{22} のピークが現れており、20MPa の方に比べると少し小さかった。一方、主値 ν_{ii} の方向については、少し変動はあるが主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向とほぼ一致している。

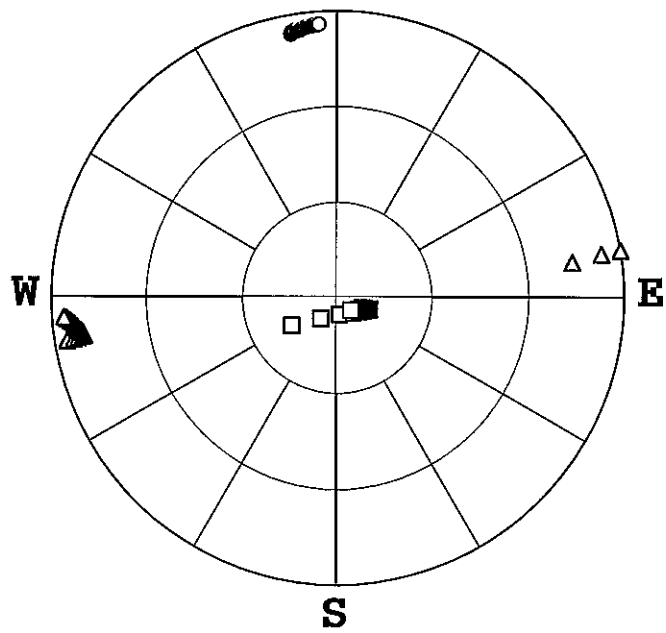
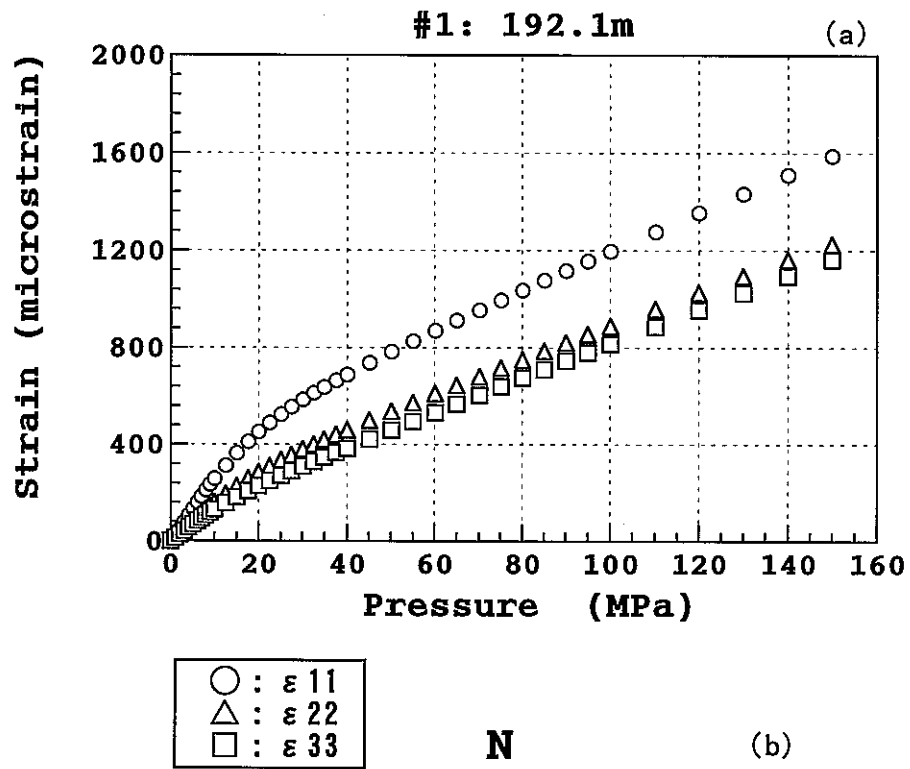


図 6.2.1 試料#1-1の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

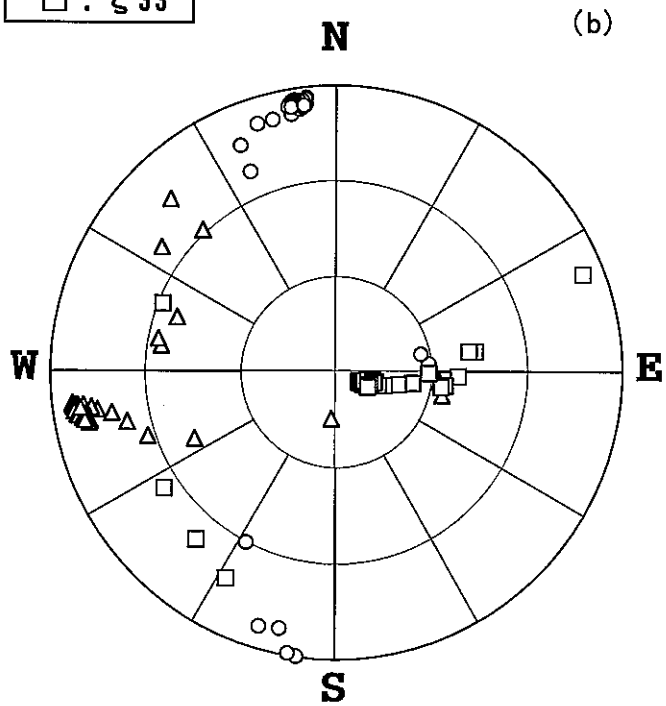
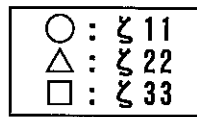
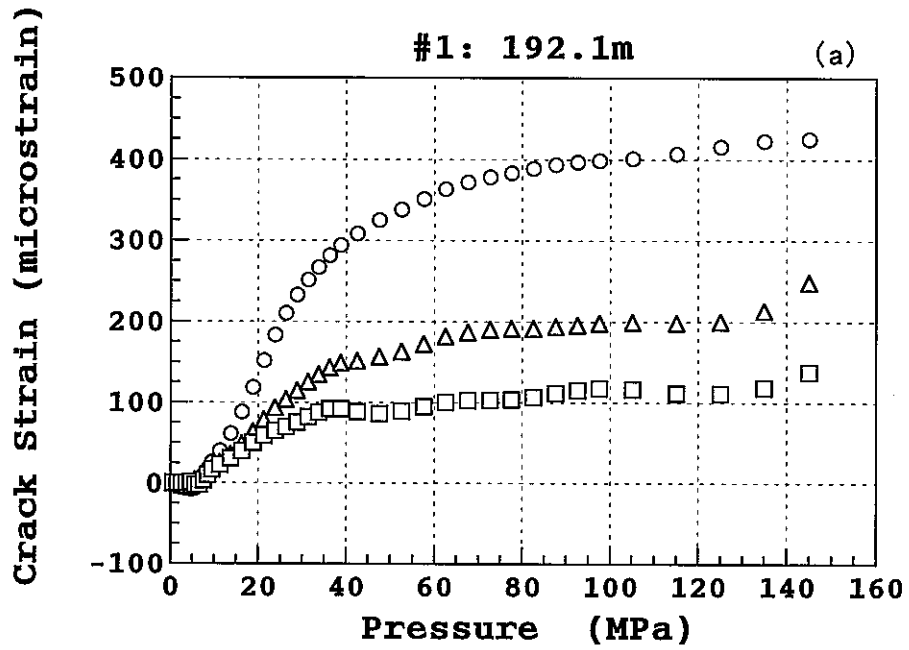


図 6.2.2 試料#1-1のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向

(a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線

(b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)

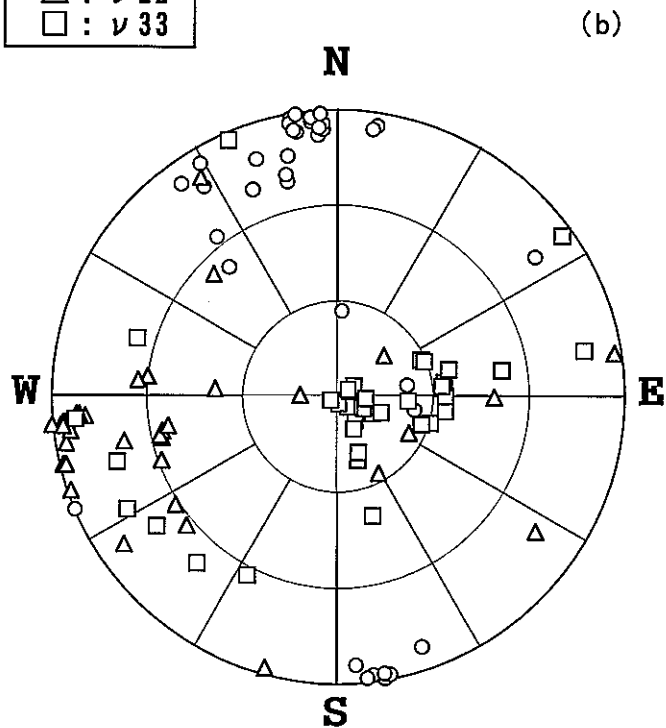
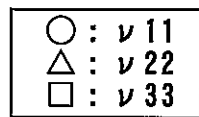
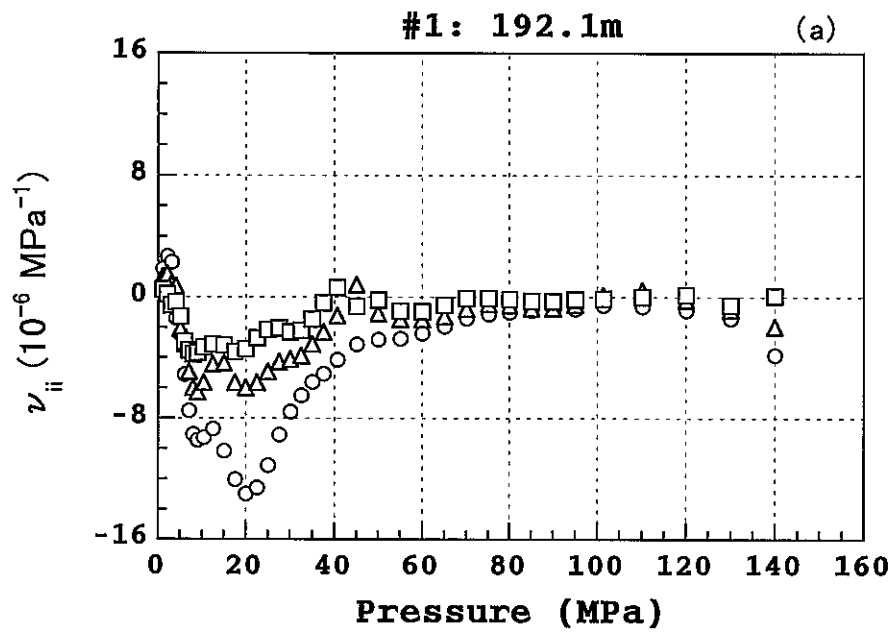


図 6.23 試料#1-1の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-2(292.6m - 293.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.4~図 6.2.6 に示した。図 6.2.4(a)において, 圧力が低い段階では最大主ひずみ (○) と中間主ひずみ (△) が近い値を示すが, 圧力が高くなると両者の差は増大する傾向が認められる。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $163\mu\text{strain}$, $247\mu\text{strain}$ 及び $84\mu\text{strain}$ となっており, 最大主ひずみの η_o と中間主ひずみの η_o が逆転していることが分かる。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $494\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.4(b)に示す主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみと中間主ひずみはともに水平面に, 最小主ひずみは鉛直方向にそれぞれ位置する。静水圧負荷に伴う主ひずみ方向の変動について, 最小主ひずみでは殆どみられなかったが, 最大主ひずみと中間主ひずみは大きく変動した。静水圧 150MPa に達したときの最大主ひずみ方向は $S60W$ となっている。しかし, 最大主ひずみの η_o と中間主ひずみの η_o が逆転しているため, 図 6.2.4(b)において両主ひずみの方向が入れ替わっていることも考えられる。即ち, 最大主ひずみの方向は $N30W$ となっている。

図 6.2.5 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{11} だけが増加傾向を示すが, 主値 ζ_{22} と ζ_{33} の大きさはあまり変わらない。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが最大主ひずみと中間主ひずみが入れ替わった状態の主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.6 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.6(a)では静水圧 12.5MPa に ν_{11} と ν_{22} の明瞭なピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

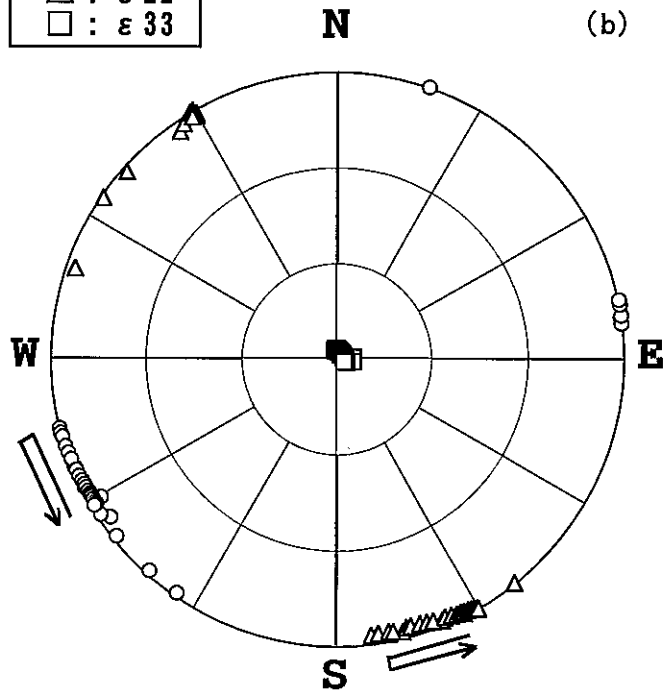
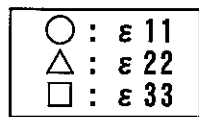
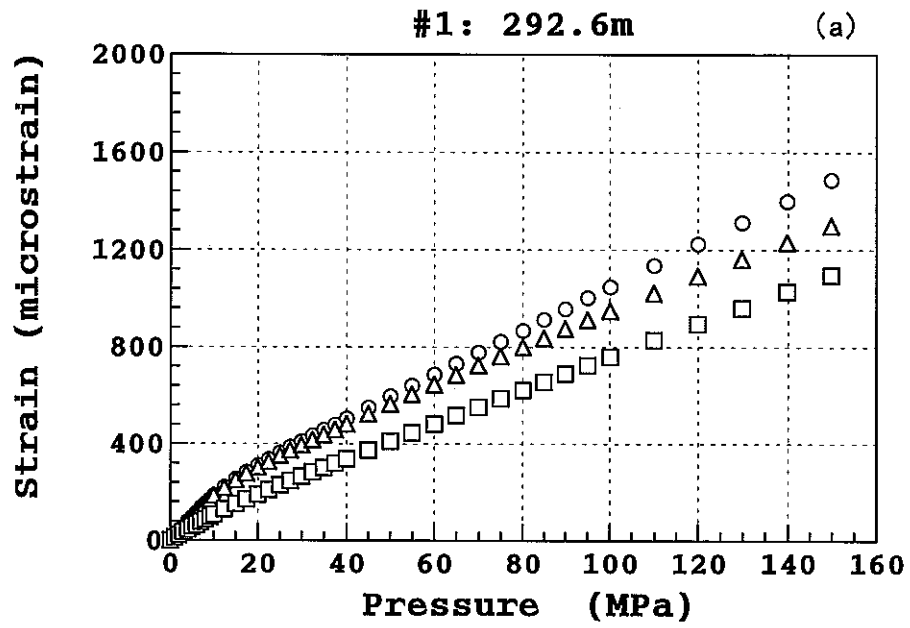


図 6.2.4 試料#1-2の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

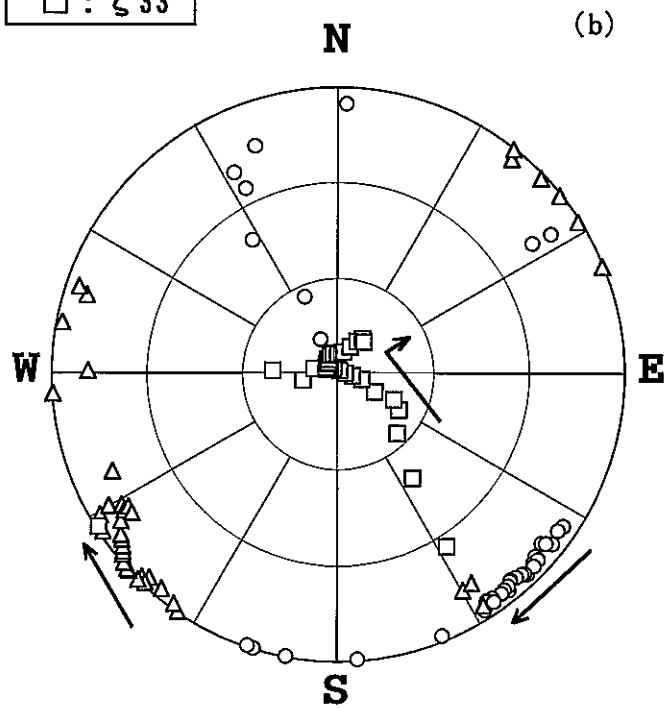
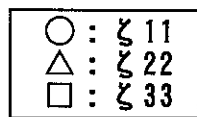
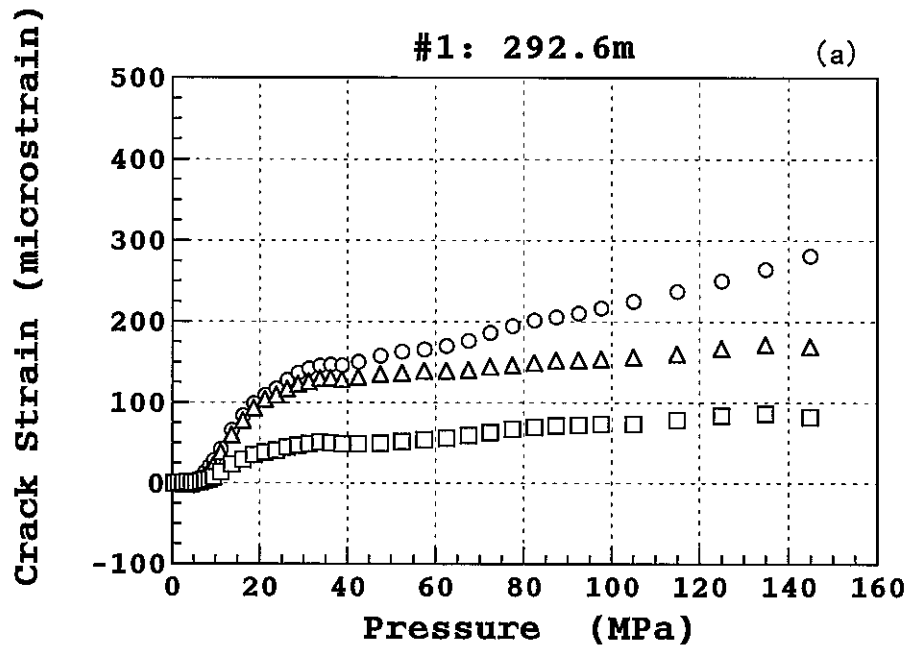


図 6.25 試料#1-2のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)

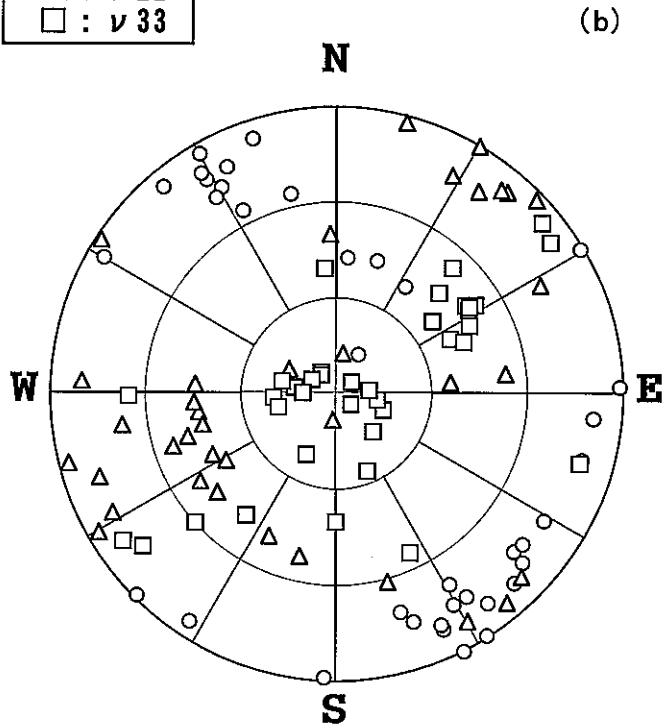
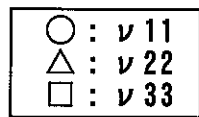
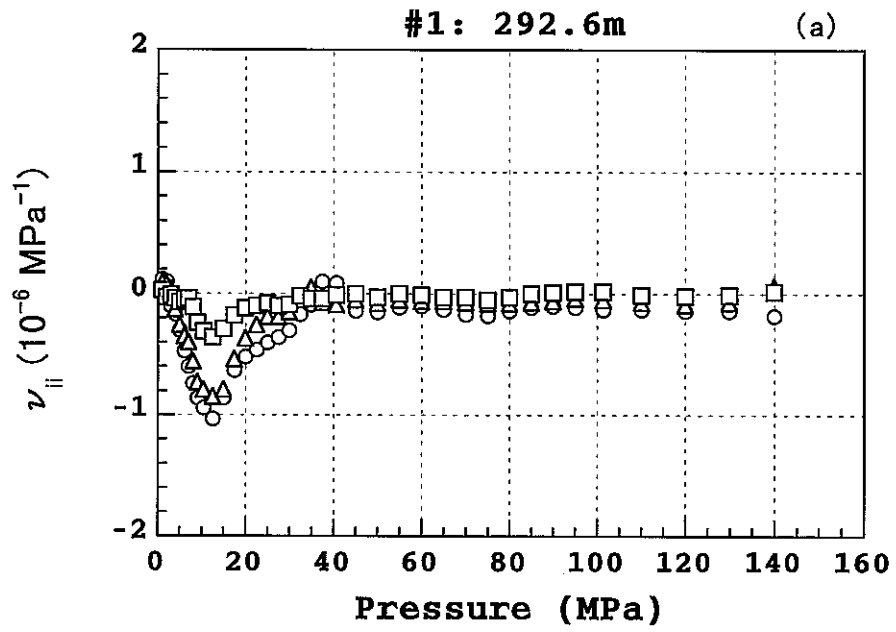


図 6.2.6 試料#1-2の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

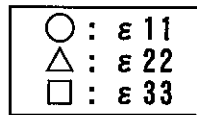
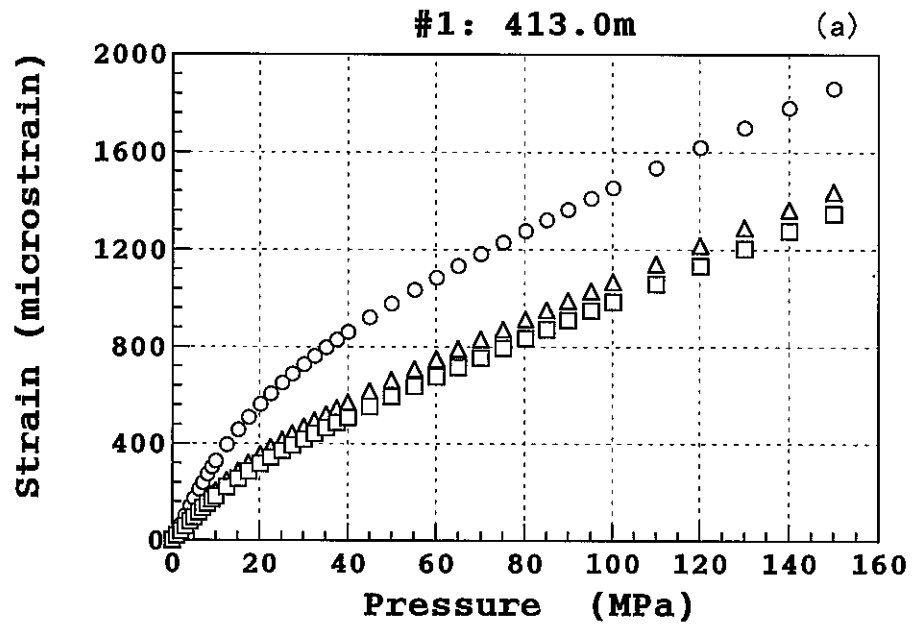
◎ 試料 #1-3(413.0m - 413.9m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.7～図 6.2.9 に示した。図 6.2.7(a)において, 3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) に比べて約 34% 大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $635 \mu\text{ strain}$, $328 \mu\text{ strain}$ 及び $260 \mu\text{ strain}$ となっている。最大主ひずみ方向のクラックひずみはそれぞれ中間主ひずみ方向の約 2 倍, 最小主ひずみ方向の約 3 倍である。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $1224 \mu\text{ strain}$ である。

図 6.2.7(b)に示す主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみはほぼ水平面内で NS 方向に位置し, 静水圧負荷に伴う主ひずみ方向の変動は殆どみられなかった。これに対し, 中間主ひずみと最小主ひずみの方向は大きく変動し, その変動幅はともに約 60° である。静水圧 150MPa に達したとき, 中間主ひずみと最小主ひずみはそれぞれ水平面と鉛直方向から約 30° 傾斜していることが分かる。

図 6.2.8 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{22} と ζ_{33} の大きさはあまり変わらないが, ζ_{11} は依然増加傾向を示している。その結果, 静水圧 150MPa に達したときの ζ_{11} の値は ζ_{22} と ζ_{33} の約 2 倍となった。一方, 主値 ζ_{ii} の方向については, 変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.9 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.9(a)では静水圧 15MPa に ν_{11} の明瞭なピークを確認することができる。 ν_{11} のピークよりは小さいが, 同一圧力で ν_{22} と ν_{33} についてもピークが認められる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, ν_{11} が主ひずみ ε_{11} やクラックひずみ主値 ζ_{11} の方向とほぼ一致しているが, ν_{22} と ν_{33} の方向は大きい変動がみられた。



N (b)

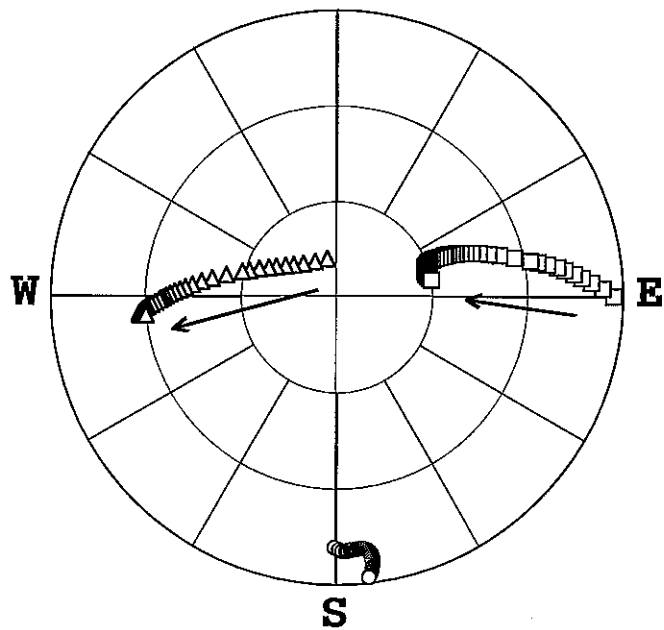


図 6.2.7 試料#1-3の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

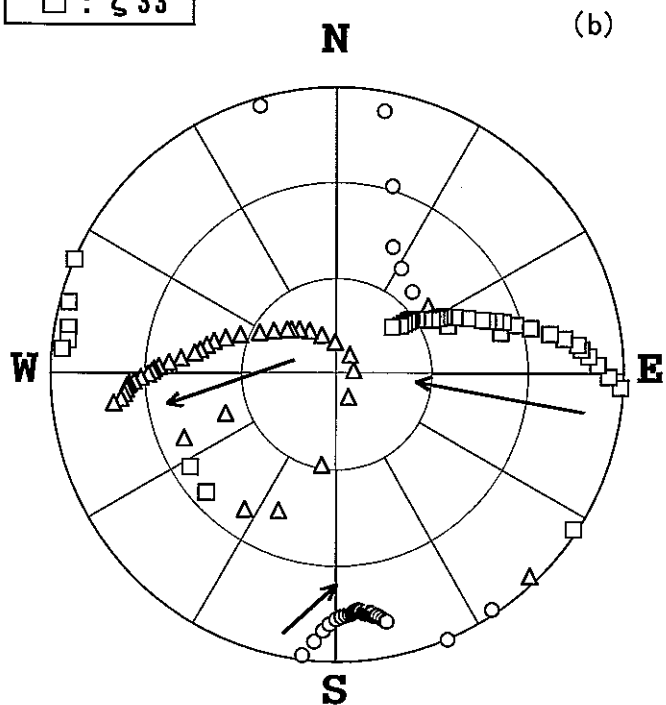
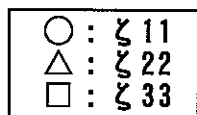
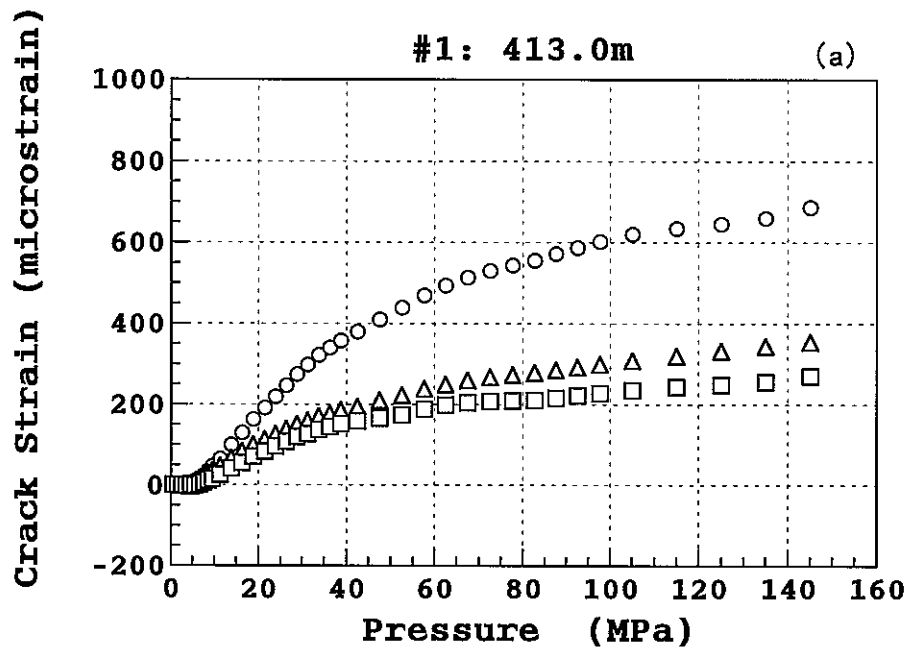
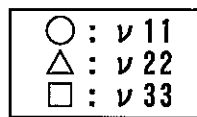
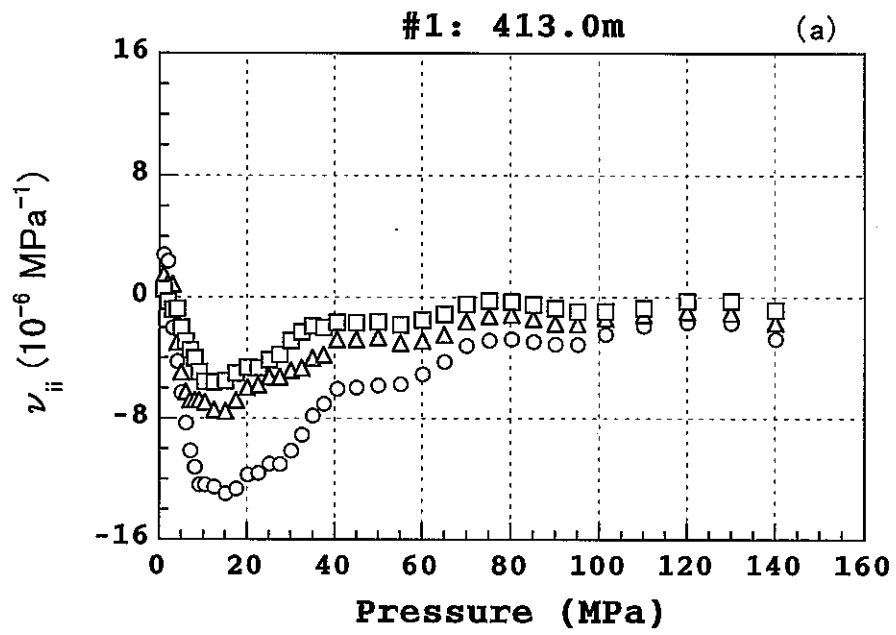


図 6.2.8 試料#1-3のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

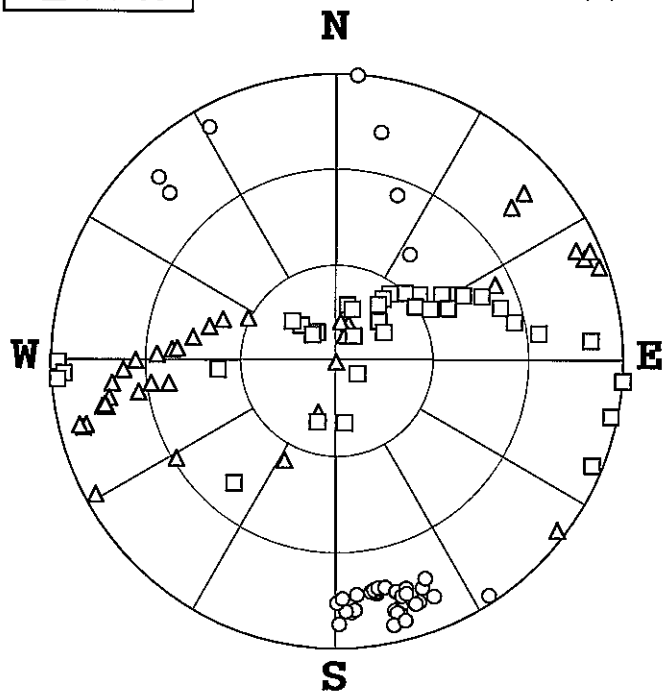


図 6.29 試料#1-3の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-4(509.5m - 510.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.10～図 6.2.12 に示した。図 6.2.10(a)に示す3つの主ひずみの値は, 最大主ひずみ (○), 中間主ひずみ (△), 最小主ひずみ (□) の順に小さくなっている。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $604\mu\text{strain}$, $331\mu\text{strain}$ 及び $165\mu\text{strain}$ となっており, 最大主ひずみ方向のクラックひずみが最も大きい値を示している。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $1100\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.10(b)に示す主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみと中間主ひずみは水平面から約 30° 傾斜し, 最小主ひずみは鉛直方向から約 30° 傾斜している。最大主ひずみ方向は N30W となっている。また, 静水圧負荷に伴う各主ひずみ方向の変動はあまり大きくなかった。

図 6.2.11 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 60MPa 以降では主値 ζ_{ii} の大きさがあまり変わらないが, 静水圧 150MPa に達したときの ζ_{11} の値はそれぞれ ζ_{22} の約 2 倍, ζ_{33} の約 4 倍となっている。一方, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.12 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.12(a)では静水圧 10MPa に ν_{11} の明瞭なピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

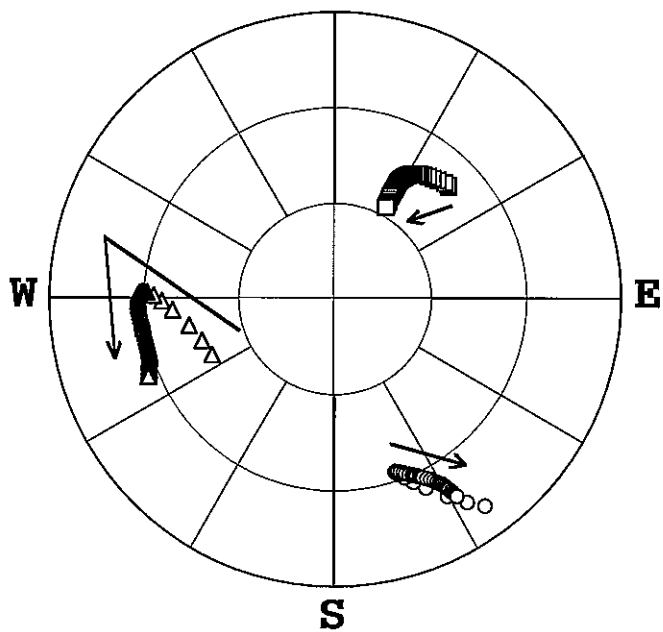
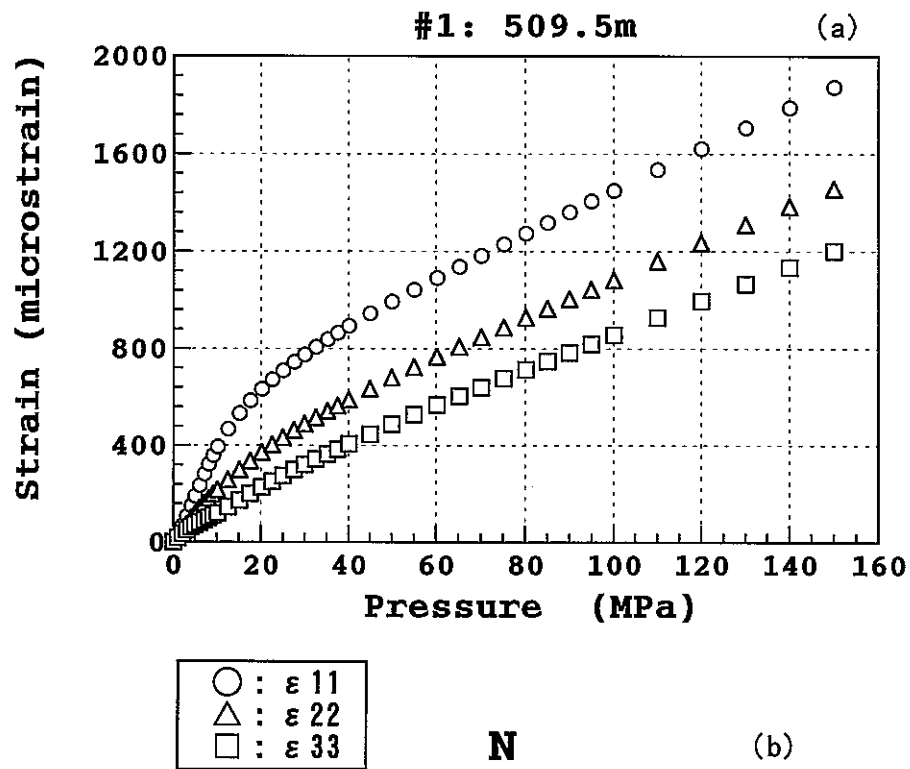


図 6.2.10 試料#1-4の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

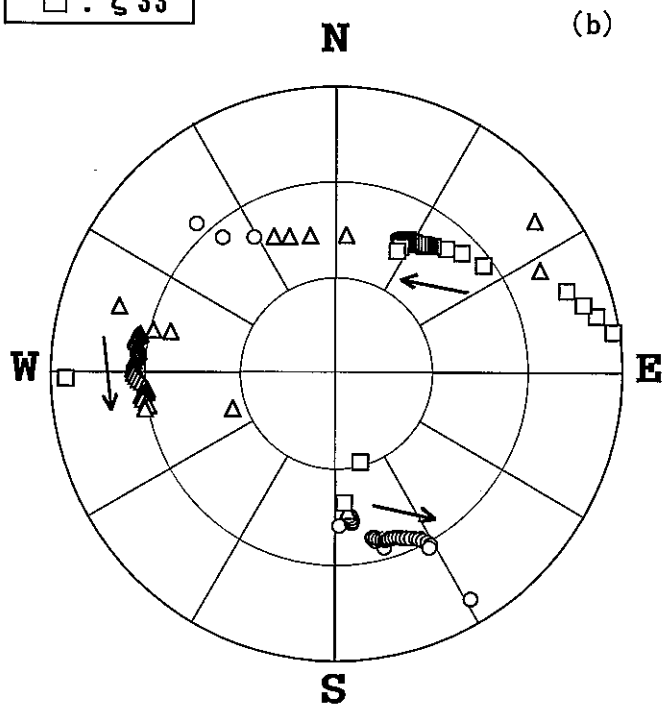
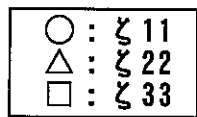
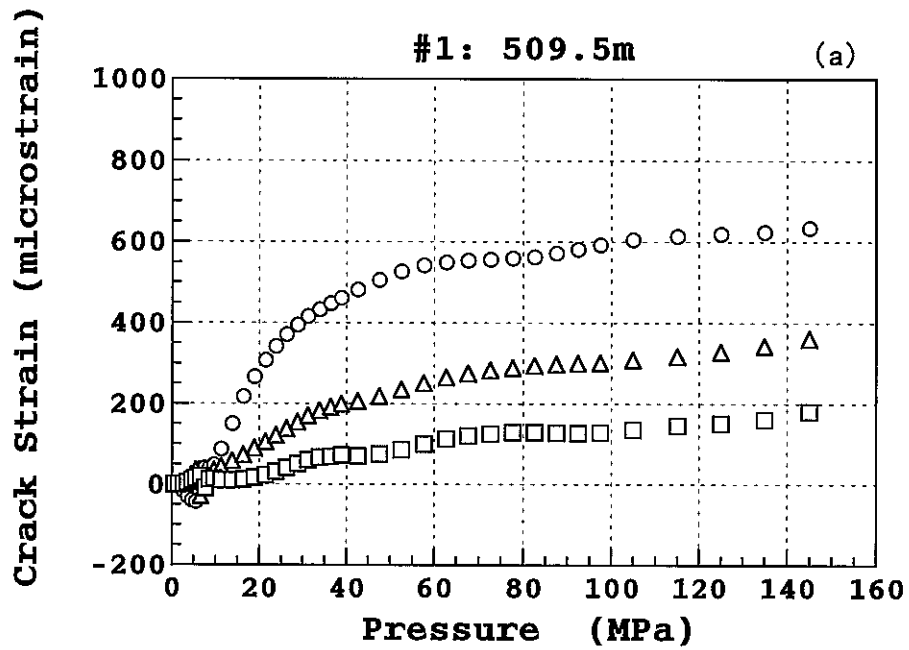
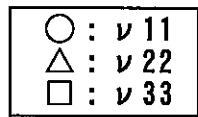
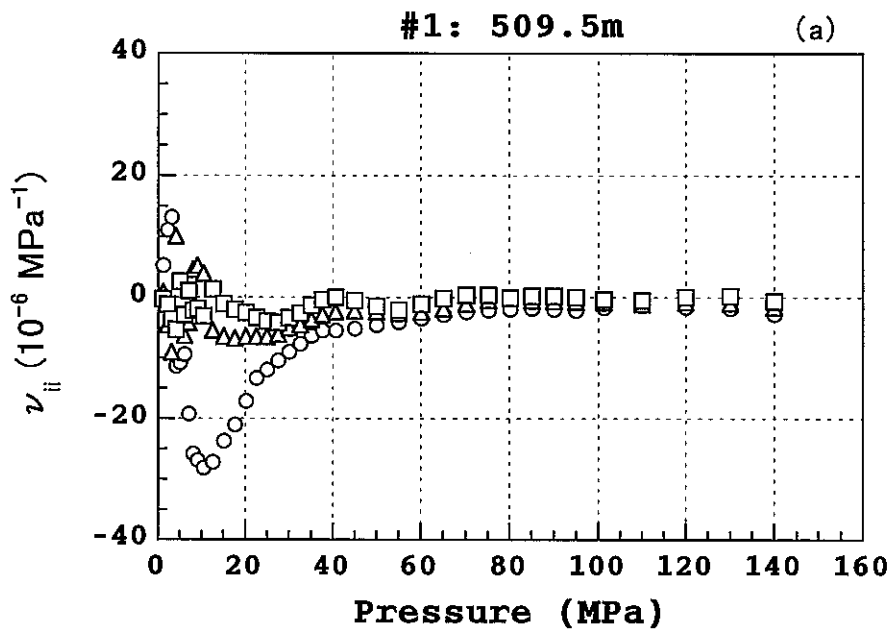


図 6.2.11 試料#1-4のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向

(a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線

(b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

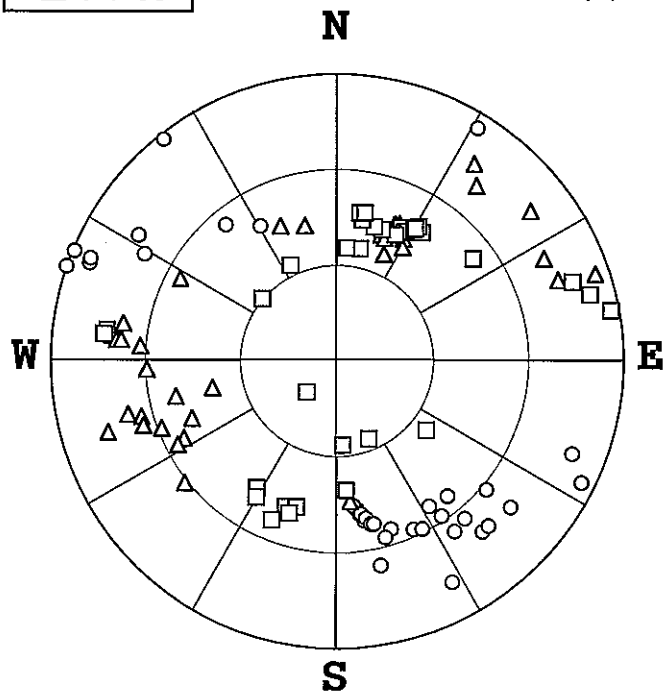


図 6.2.12 試料#1-4の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-5(582.2m - 582.8m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.13～図 6.2.15 に示した。図 6.2.13(a)に示す3つの主ひずみの値は, 最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) に比べて約20%大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $406\mu\text{strain}$, $162\mu\text{strain}$ 及び $78\mu\text{strain}$ となっており, 最大主ひずみ方向のクラックひずみが最も大きい値を示している。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $646\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.13(b)に示す主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみはほぼ水平面内の N45W 方向に位置する。静水圧負荷に伴う中間主ひずみと最小主ひずみの方向の変動は大きかった。静水圧 150MPa に達したときの中間主ひずみと最小主ひずみは, それぞれほぼ鉛直と水平方向わずかに傾斜している。しかし, 静水圧 40MPa 以降の両者のひずみ値が非常に近いので, 主ひずみ方向が入れ替わっていることも考えられる。

図 6.2.14 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の大きさがあまり変わらないが, 静水圧 150MPa に達したときの ζ_{11} の値はそれぞれ ζ_{22} の約2倍, ζ_{33} の約5倍となっている。一方, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.15 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.15(a)では静水圧 20MPa に ν_{11} の明瞭なピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

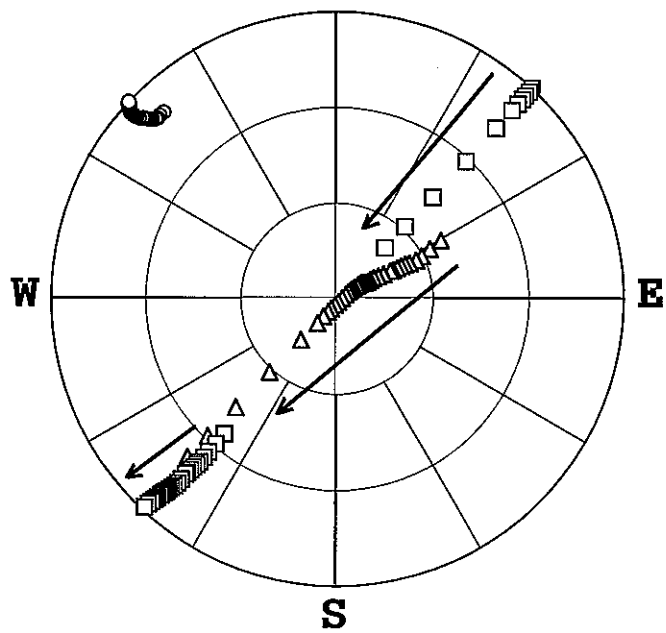
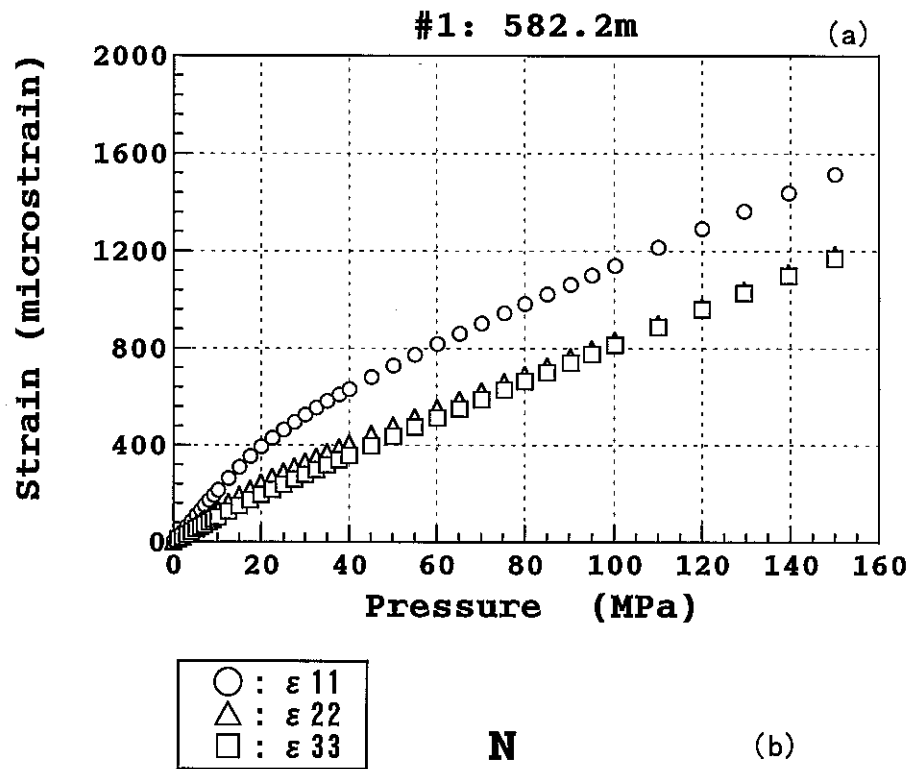


図 6.2.13 試料#1-5の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

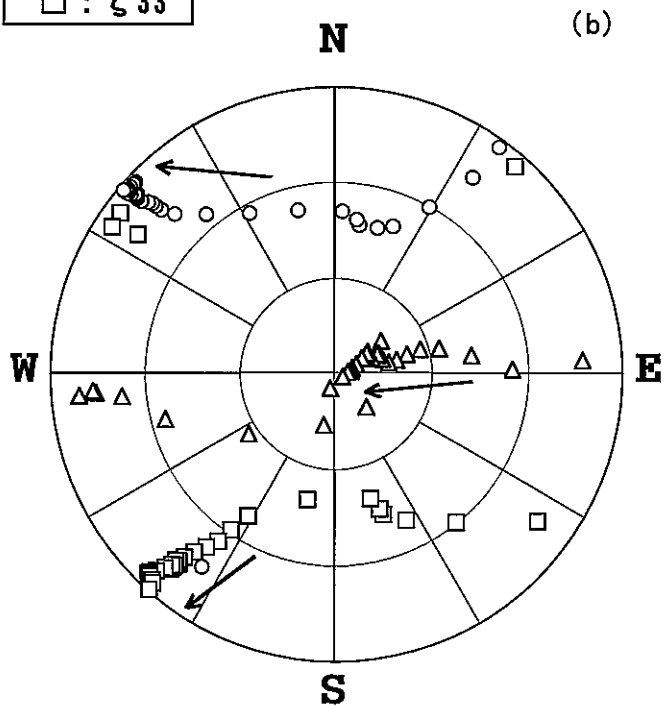
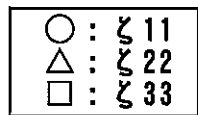
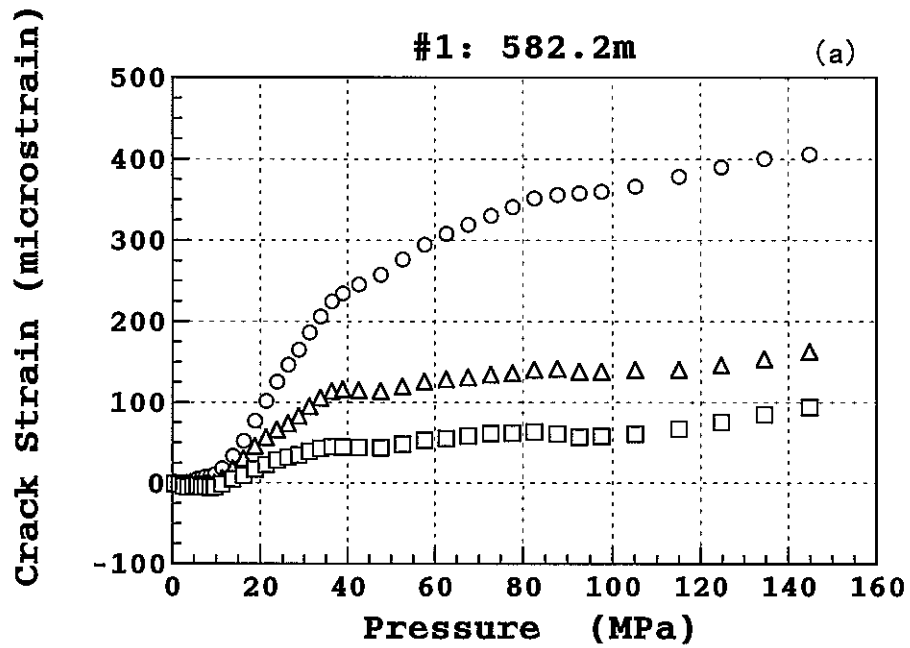
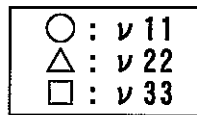
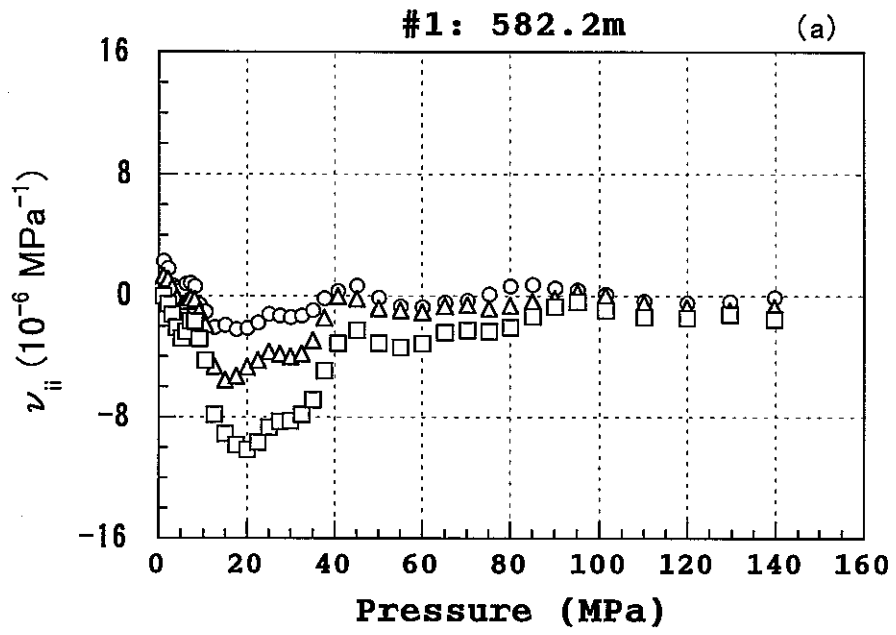


図 6.2.14 試料#1-5のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

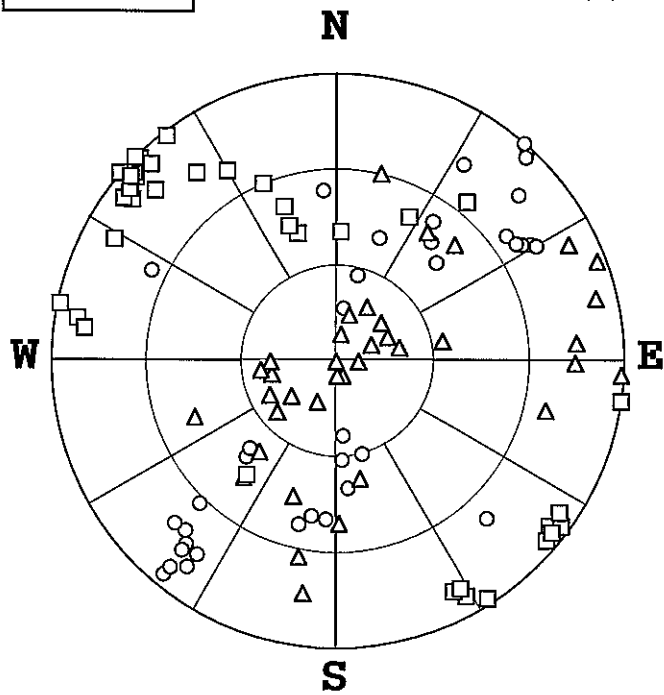


図 6.2.15 試料#1-5の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-6(586.4m - 587.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.16～図 6.2.18 に示した。図 6.2.16(a)に示す3つの主ひずみの値は, 最大主ひずみ (○), 中間主ひずみ (△), 最小主ひずみ (□) の順に小さくなっている。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $312\mu\text{strain}$, $188\mu\text{strain}$ 及び $92\mu\text{strain}$ となっており, 最大主ひずみ方向のクラックひずみが最も大きい値を示している。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $592\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.16(b)に示す主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみは水平面からわずかに傾斜しており, ほぼ EW 方向である。中間主ひずみは水平面から約 30° 傾斜し, 最小主ひずみは鉛直方向から約 30° 傾斜している。また, 静水圧負荷に伴う各主ひずみ方向の変動はあまり大きくなかった。

図 6.2.17 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の大きさがあまり変わらない。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.18 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.18(a)では静水圧 17.5MPa に ν_{11} の明瞭なピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

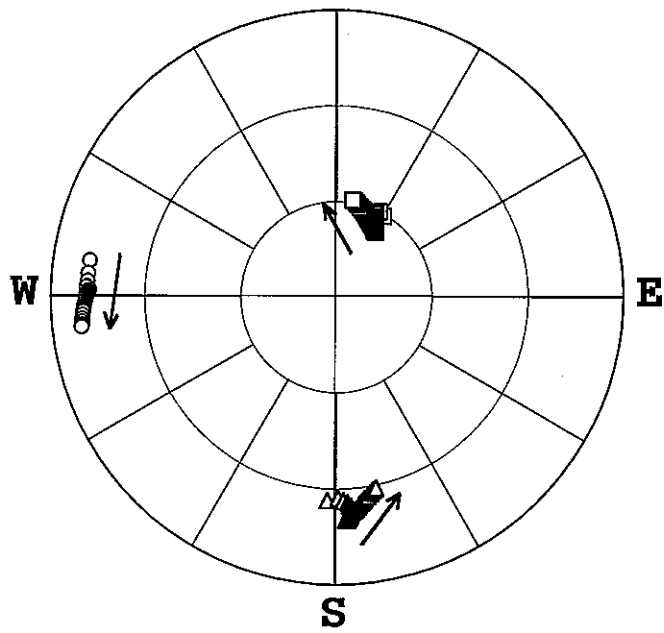
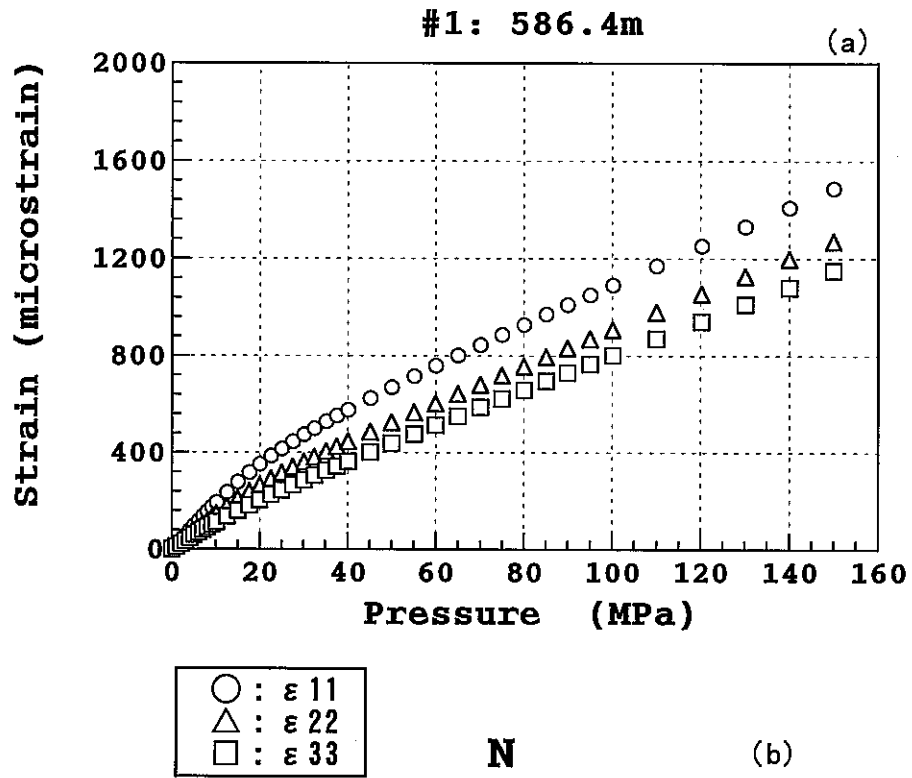


図 6.2.16 試料#1-6の主ひずみ ε_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

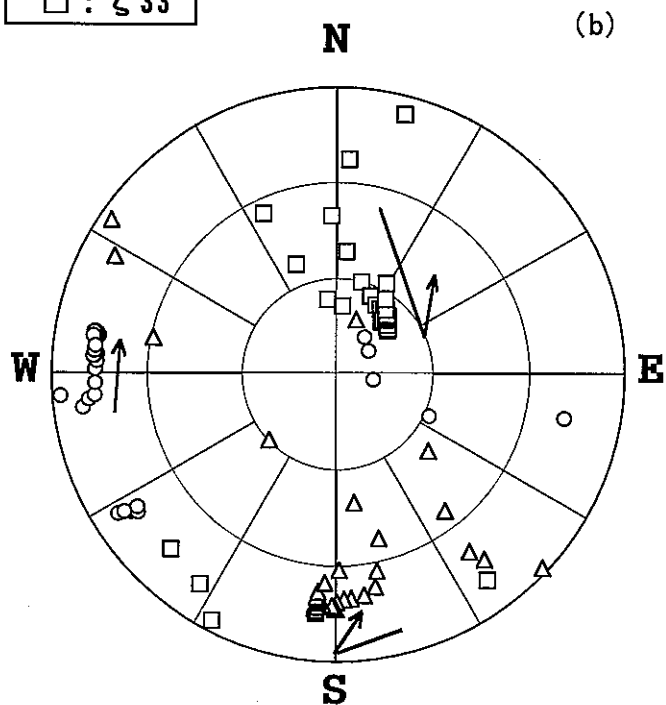
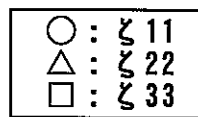
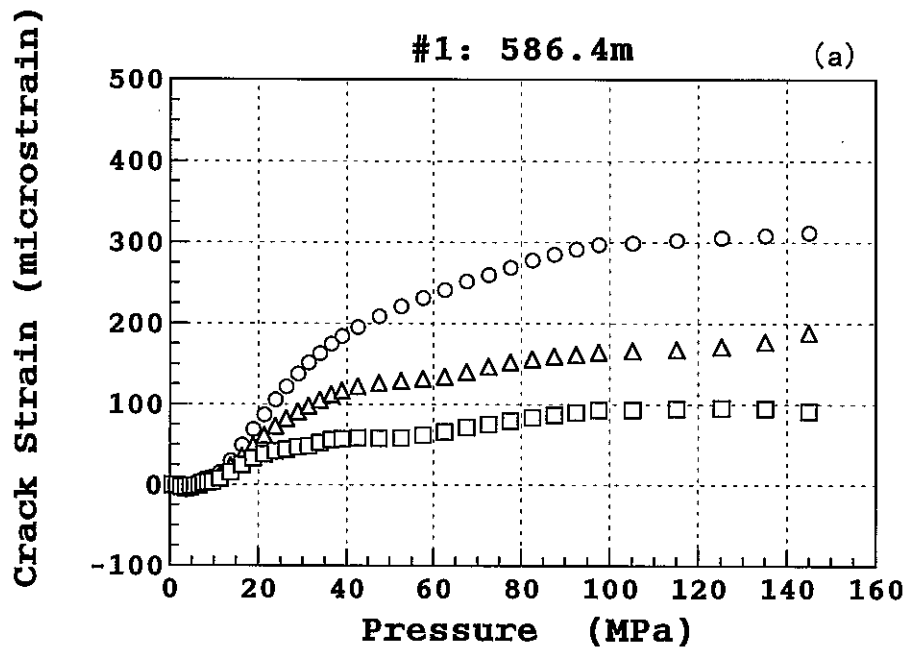
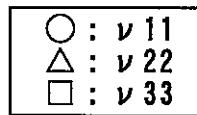
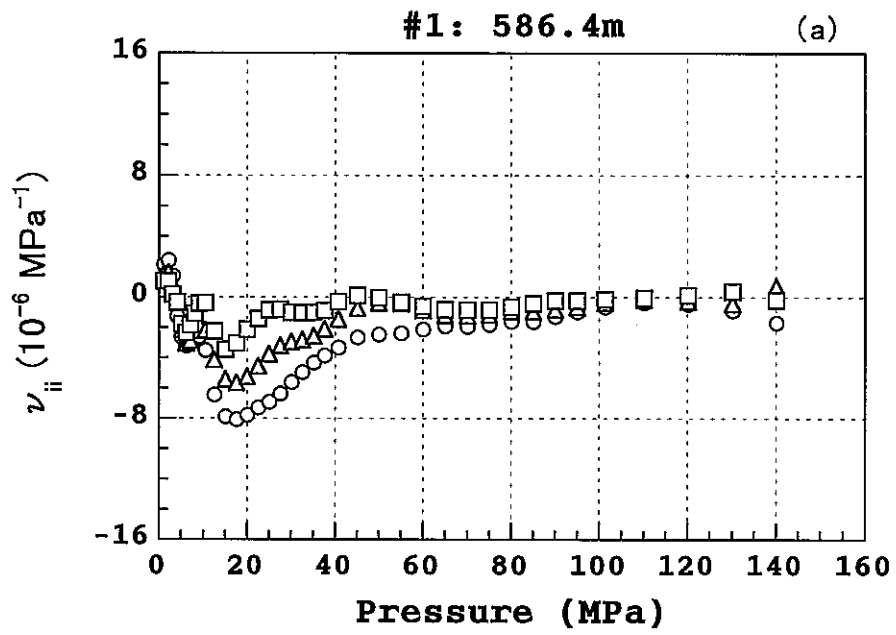


図 6.2.17 試料#1-6のクラックひずみ主値と ξ_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線

(b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

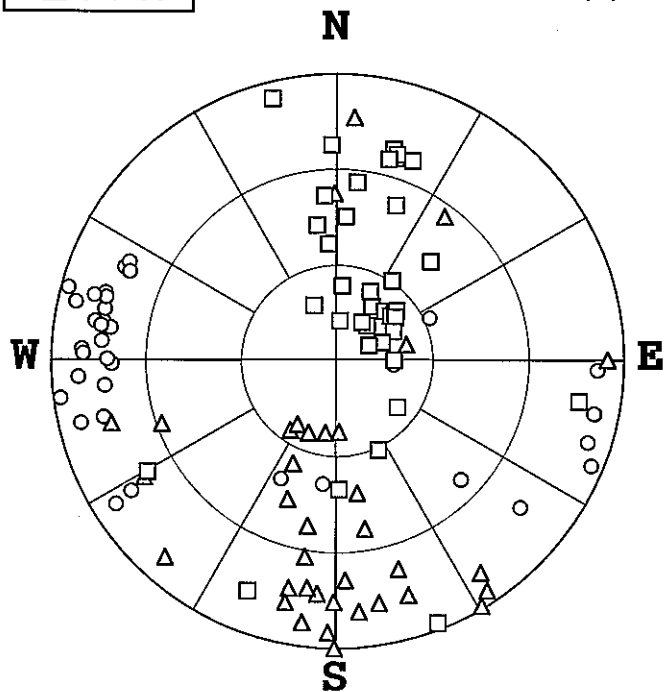


図 6.2.18 試料#1-6の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-7(677.0m - 677.9m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.19～図 6.2.21 に示した。図 6.2.19(a)において, 3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) よりやや大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ 288 μ strain, 178 μ strain 及び 139 μ strain となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は 604 μ strain である。

図 6.2.19(b)に示す主ひずみ方向に注目すると, 静水圧 150MPa に達したときの最大主ひずみと最小主ひずみは, 水平面からそれぞれ約 20° と 30° 傾斜し, 中間主ひずみは鉛直方向から約 30° 傾斜している。静水圧負荷に伴う各主ひずみ方向の変動幅は大きく, 測定終了時の主ひずみ方向は S15E となっている。

図 6.2.20 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では圧力の負荷に伴って主値 ζ_{ii} が緩やかな増加がみられた。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} の方向に比べてとほぼ一致しているが, 圧力 15MPa 以降では主値 ζ_{ii} の方向が安定している。

図 6.2.21 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.21(a)では静水圧 20MPa に ν_{11} と ν_{22} の明瞭なピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 少し変動はあるが主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向とほぼ一致している。

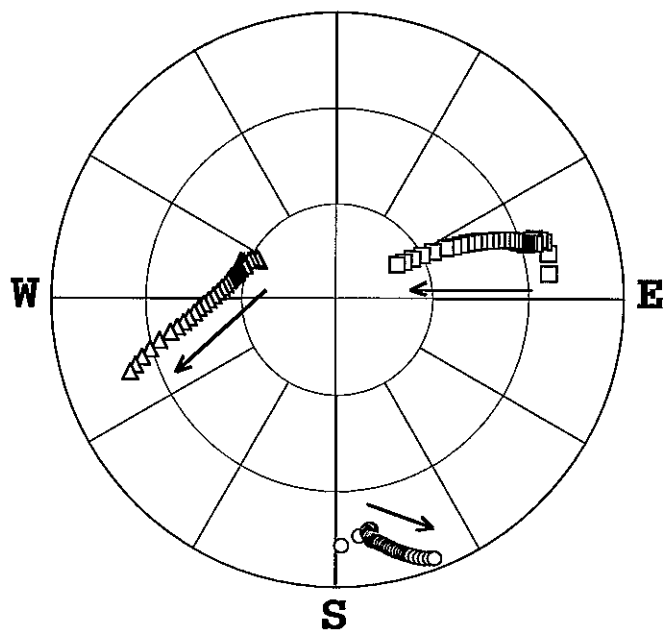
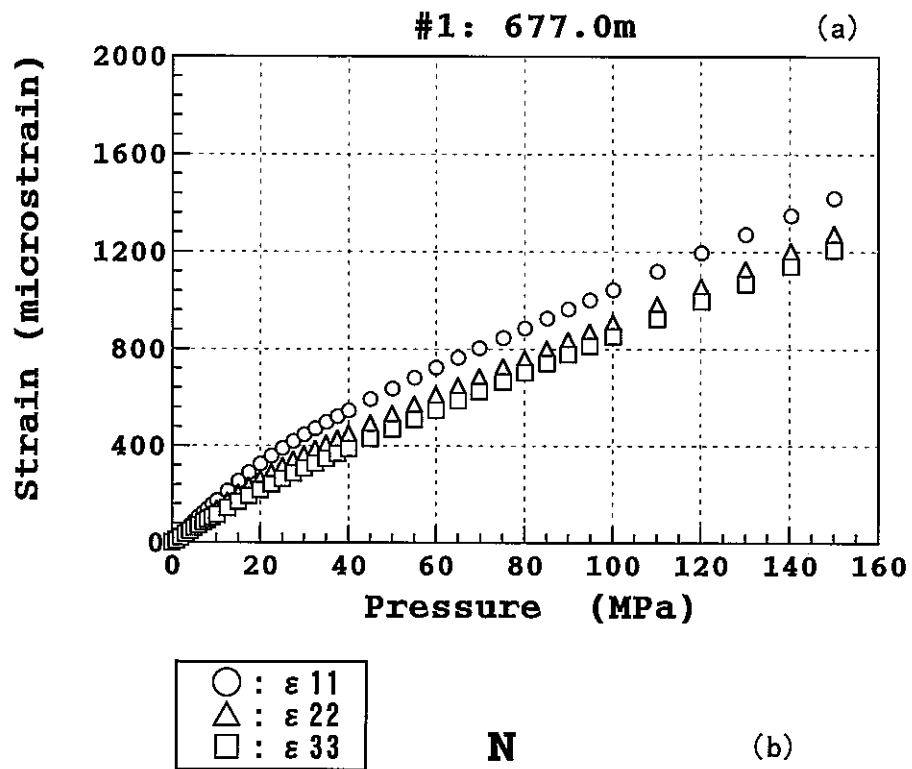


図 6.2.19 試料#1-7の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

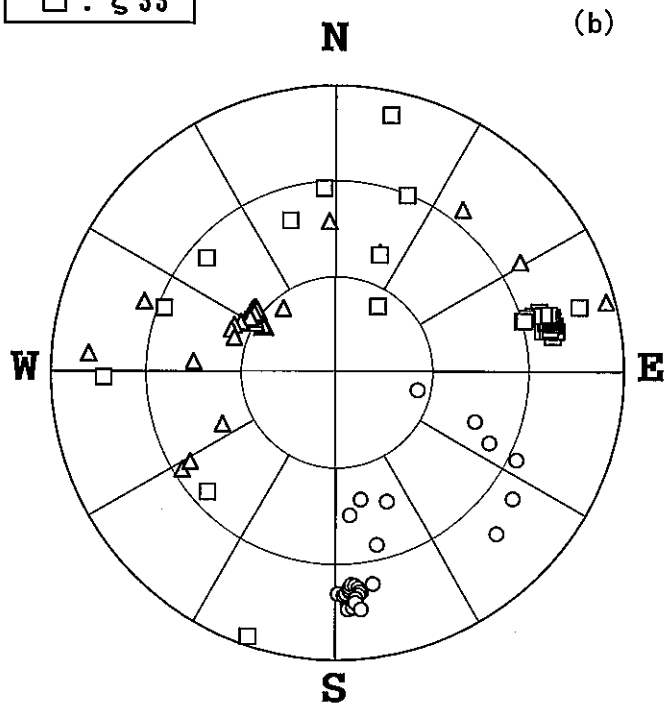
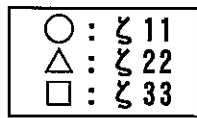
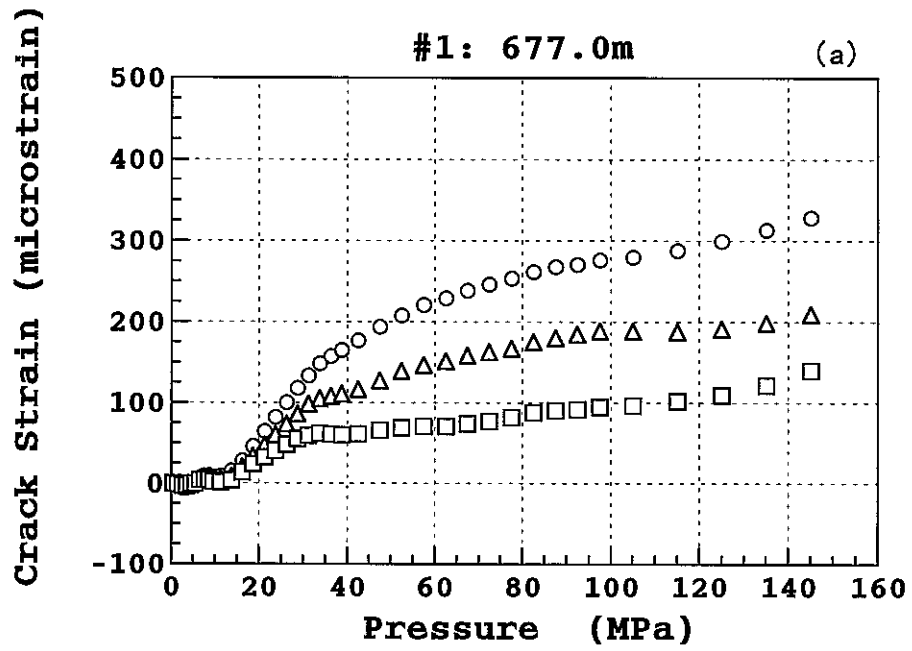
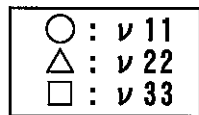
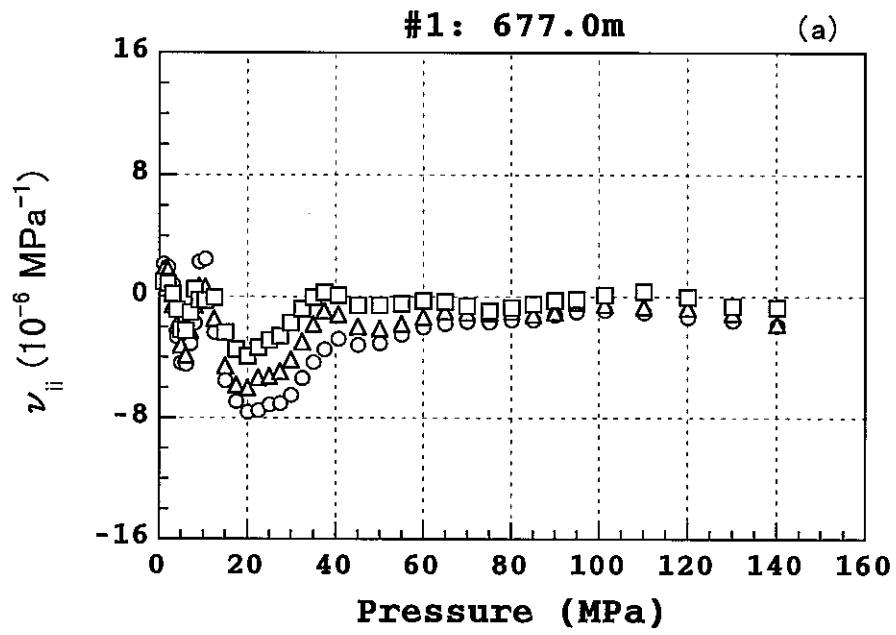


図 6.2.20 試料#1-7のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

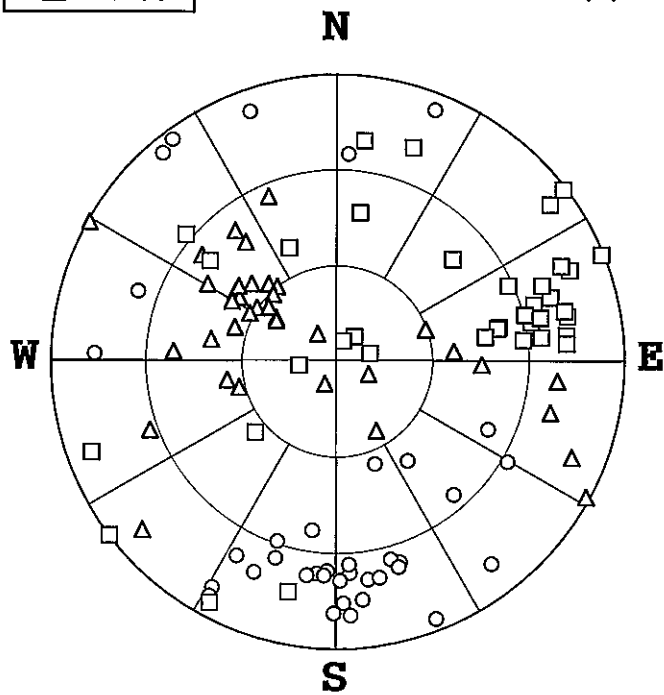


図 6.2.21 試料#1-7の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-8(751.4m - 752.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.22～図 6.2.24 に示した。図 6.2.22(a)に示す3つの主ひずみの値は最大主ひずみ (○), 中間主ひずみ (△), 最小主ひずみ (□) の順に小さくなっている。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $408 \mu\text{strain}$, $329 \mu\text{strain}$ 及び $185 \mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $922 \mu\text{strain}$ である。

図 6.2.22(b)の主ひずみ方向に注目すると, 中間主ひずみはほぼ水平面に位置するが, 最大主ひずみと最小主ひずみはそれぞれ水平面と鉛直方向からともに約 30° 傾斜している。最大主ひずみ方向は N20E となっている。静水圧負荷に伴う各主ひずみ方向の変動はあまり大きくなかった。

図 6.2.23 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっている。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.24 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.24(a)では静水圧 8MPa と 20MPa にそれぞれ ν_{11} と ν_{22} のピークを確認することができる。静水圧 8MPa にあるピークが 20MPa のピークよりも明瞭である。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

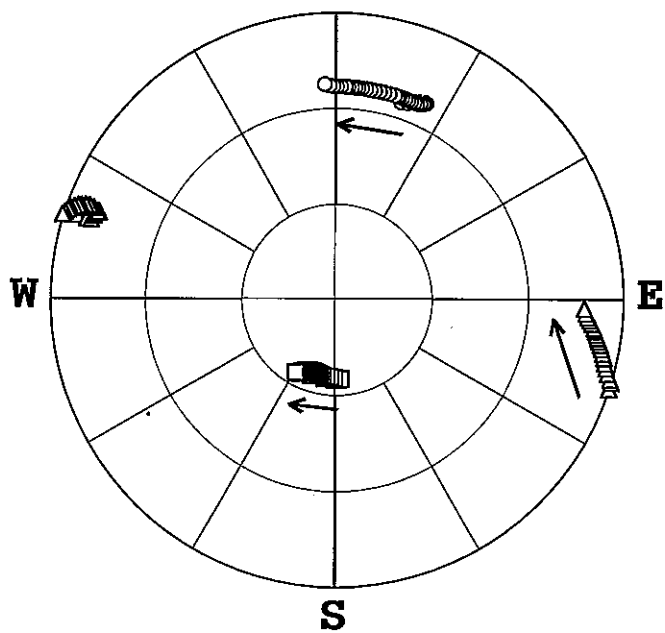
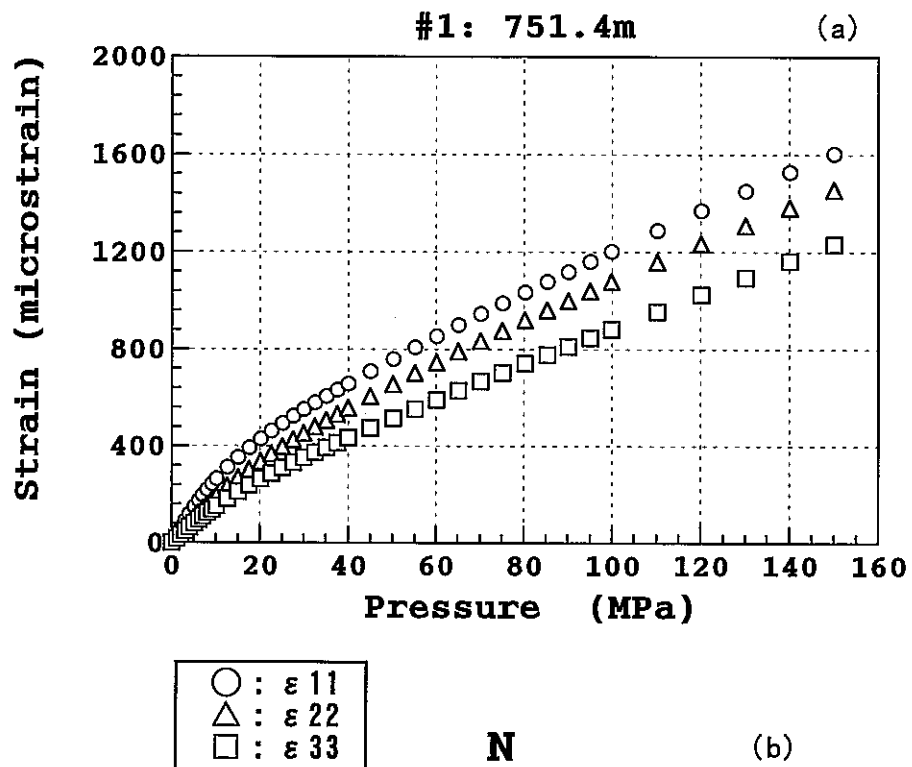


図 6.2.22 試料#1-8の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

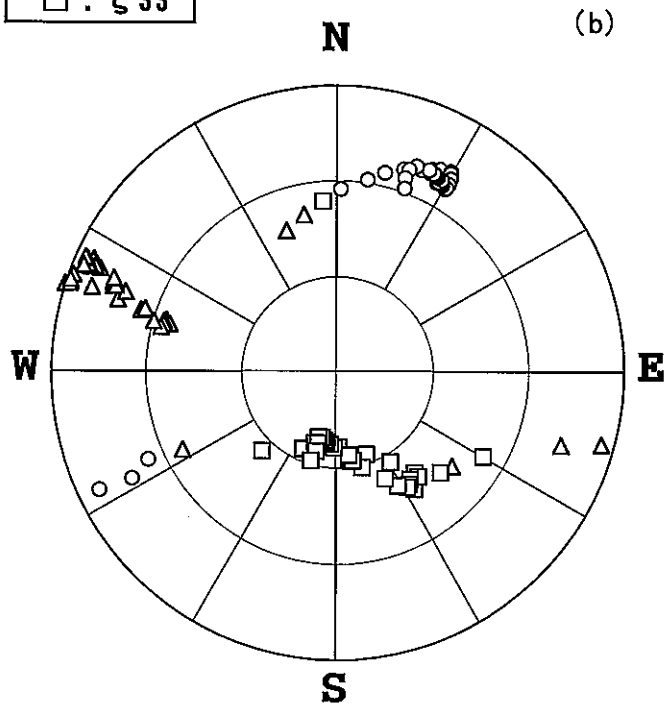
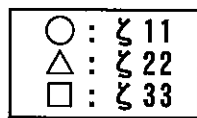
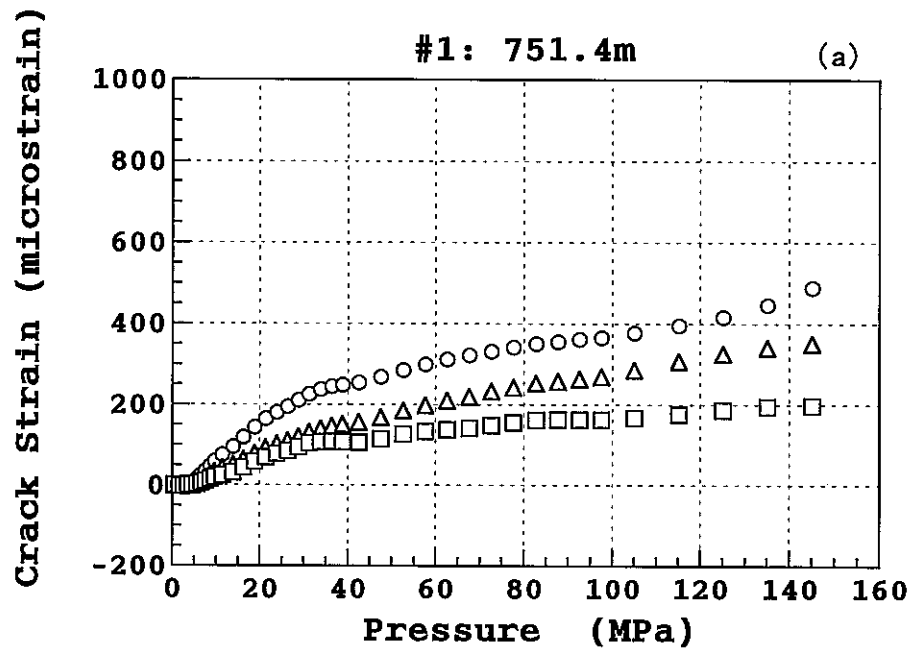
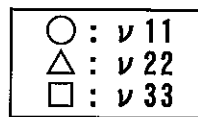
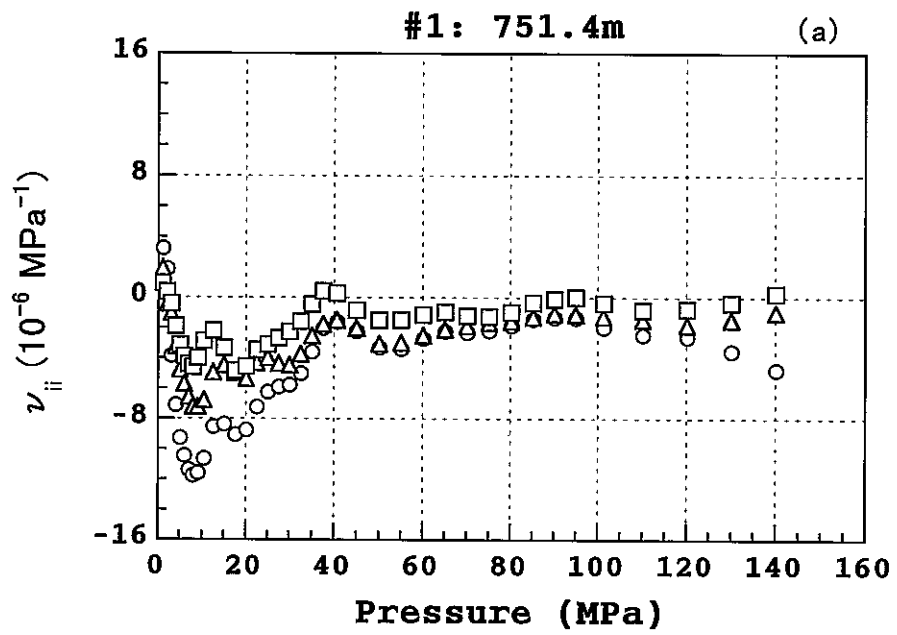


図 6.2.23 試料#1-8のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

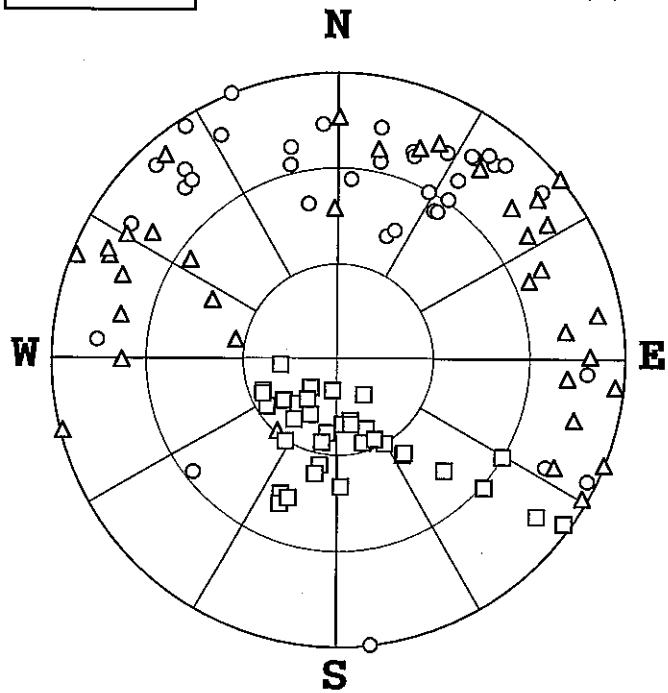


図 6.2.24 試料#1-8の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

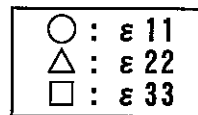
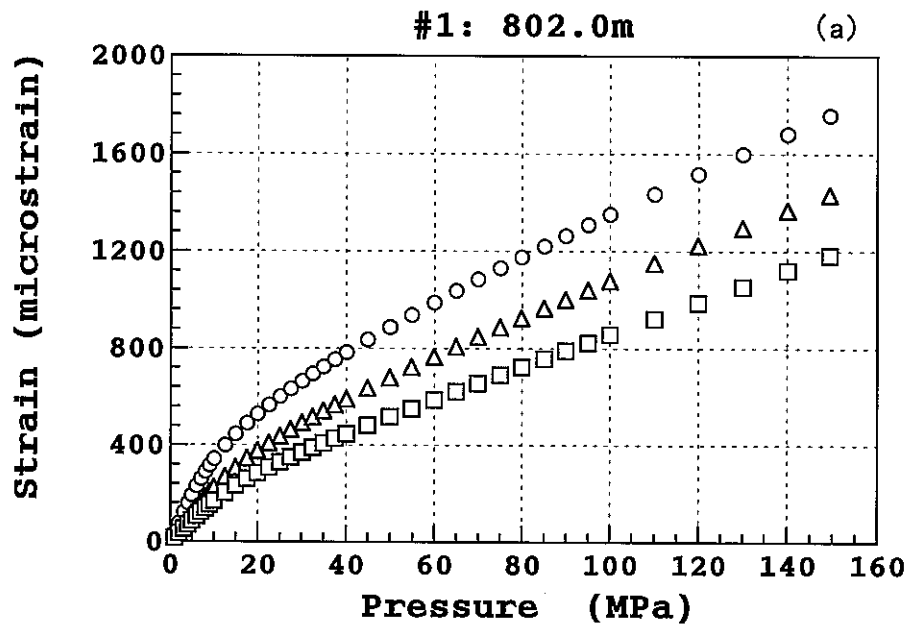
◎ 試料 #1-9(802.0m - 802.9m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.25～図 6.2.27 に示した。図 6.2.25(a)に示す3つの主ひずみの値は, 最大主ひずみ (○), 中間主ひずみ (△), 最小主ひずみ (□) の順に小さくなっている。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $534\mu\text{strain}$, $359\mu\text{strain}$ 及び $199\mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $1092\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.25(b)の主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみと中間主ひずみはほぼ水平面に位置し, 最小主ひずみは鉛直方向から約 30° 傾斜している。最大主ひずみ方向は N30E となっている。また, 静水圧負荷に伴う各主ひずみ方向はあまり大きく変動しなかった。

図 6.2.26 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっている。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.27 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.27(a)では静水圧 6MPa に ν_{11} だけがピークを示している。これに対し, 静水圧 15MPa では ν_{11} , ν_{22} と ν_{33} とも明瞭なピークを示している。ピークの ν_{ii} の大きさについて, 静水圧 6MPa と 15MPa ではそれぞれ約 $20 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ と $15 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ であり, それほど大きな差はない。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 少し変動はあるが主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向とほぼ一致している。



N (b)

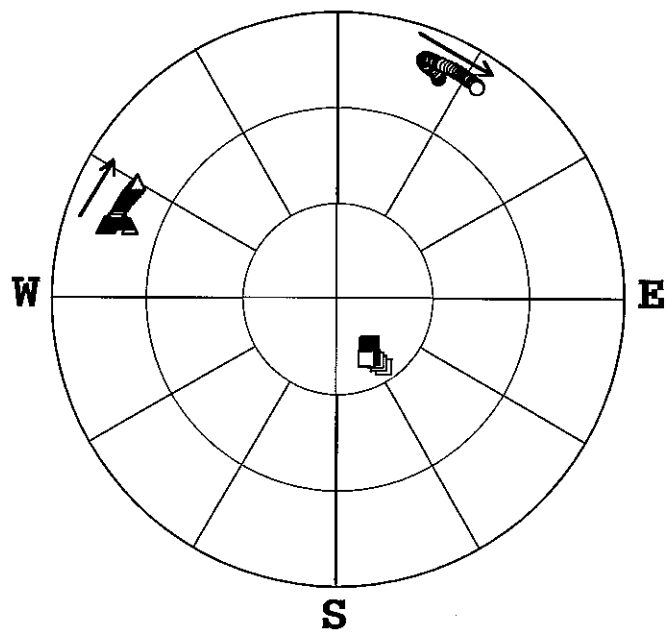


図 6.2.25 試料#1-9の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

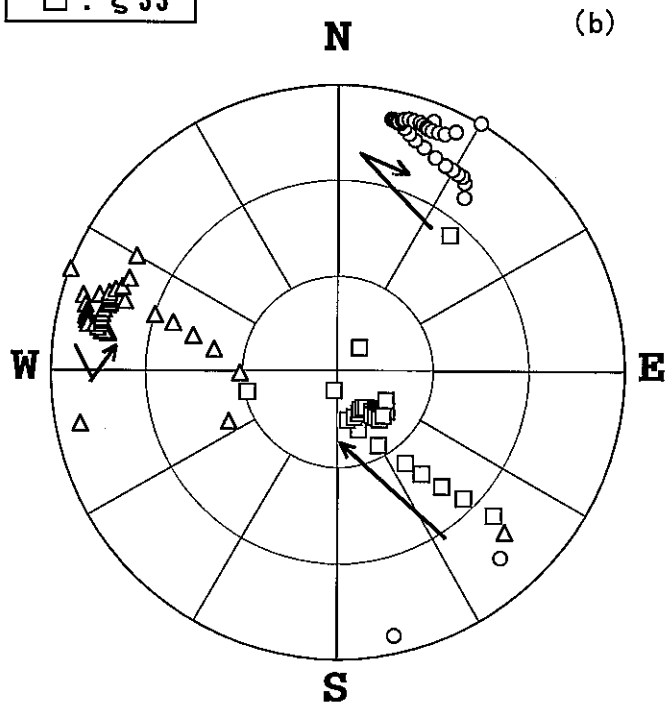
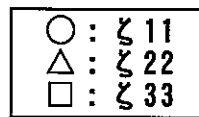
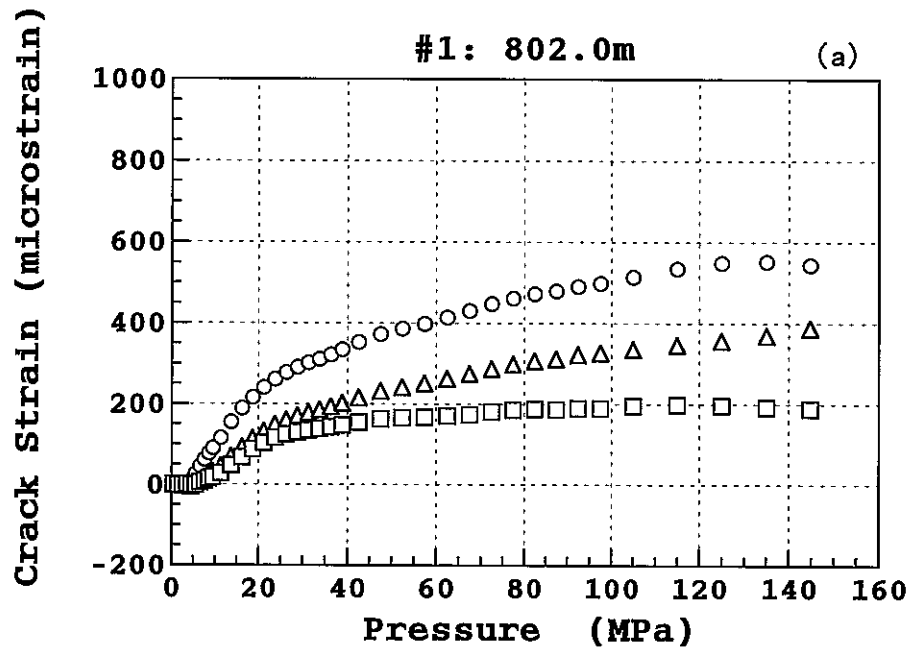
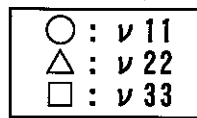
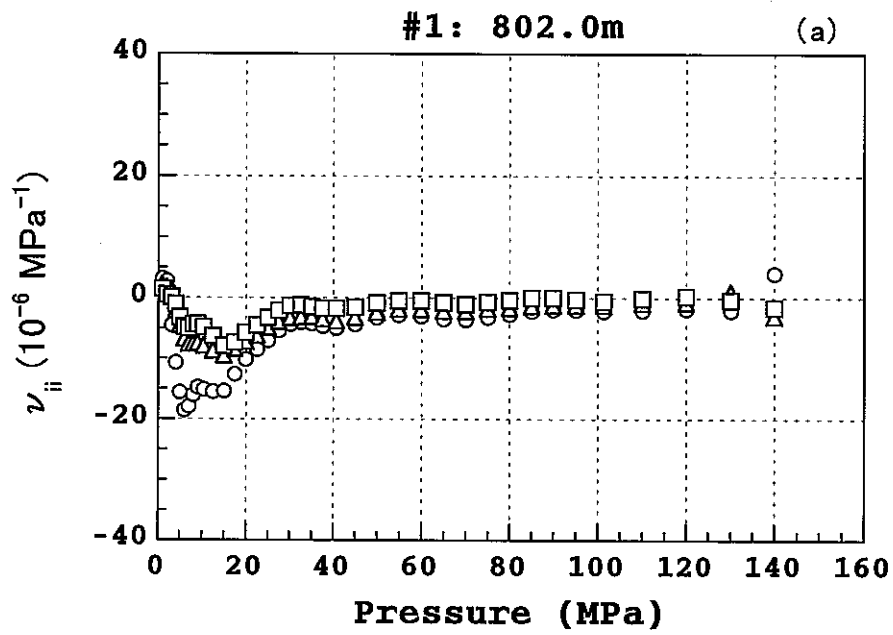


図 6.2.26 試料#1-9のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向

(a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線

(b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

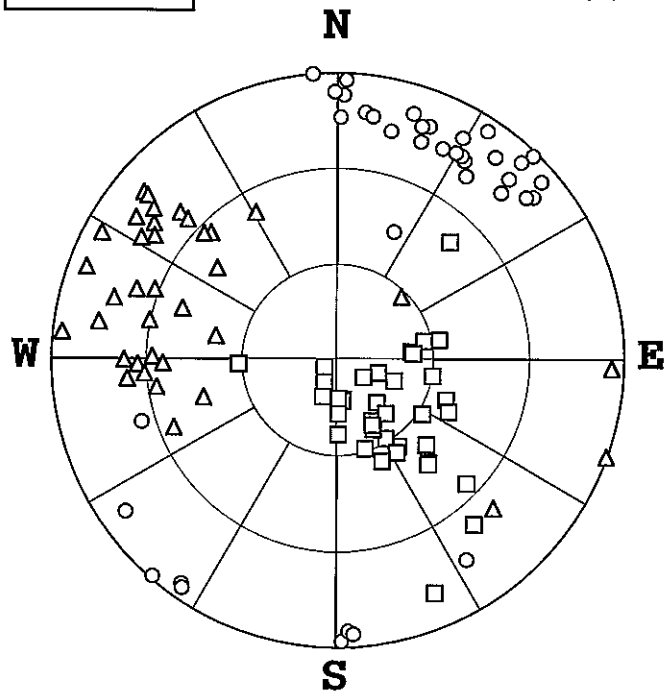


図 6.2.27 試料#1-9の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #1-10(927.0m - 927.7m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.28～図 6.2.30 に示した。図 6.2.28(a)において, 3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) よりやや大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $491\mu\text{strain}$, $359\mu\text{strain}$ 及び $313\mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $1163\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.28(b)の主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみは水平面から約 30° 傾斜し, ほぼ EW 方向に位置する。一方, 中間主ひずみと最小主ひずみは静水圧の負荷に伴う主ひずみ方向は大きく変動し, 静水圧 150MPa に達した時, 両者はともに水平面から約 40° 傾斜していることが分かる。

図 6.2.29 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっている。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.30 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.30(a)では静水圧 17.5MPa に ν_{ii} の明瞭なピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

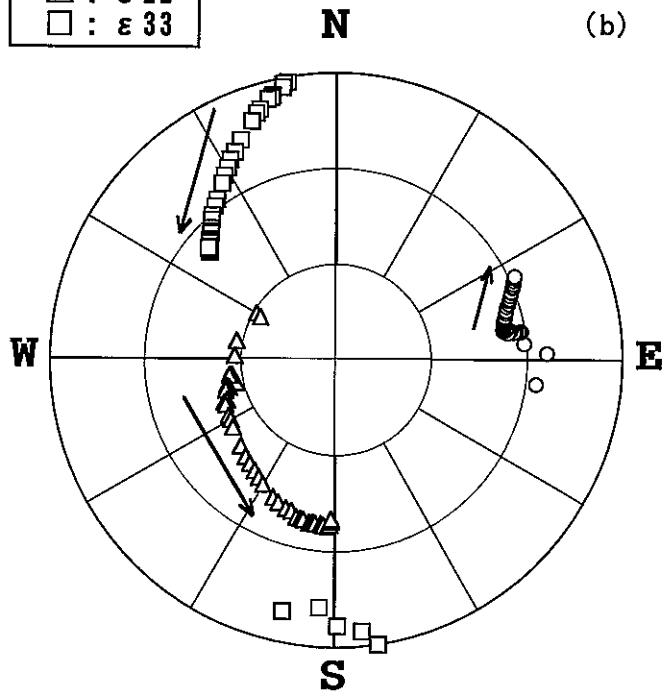
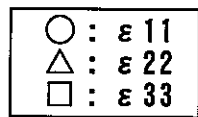
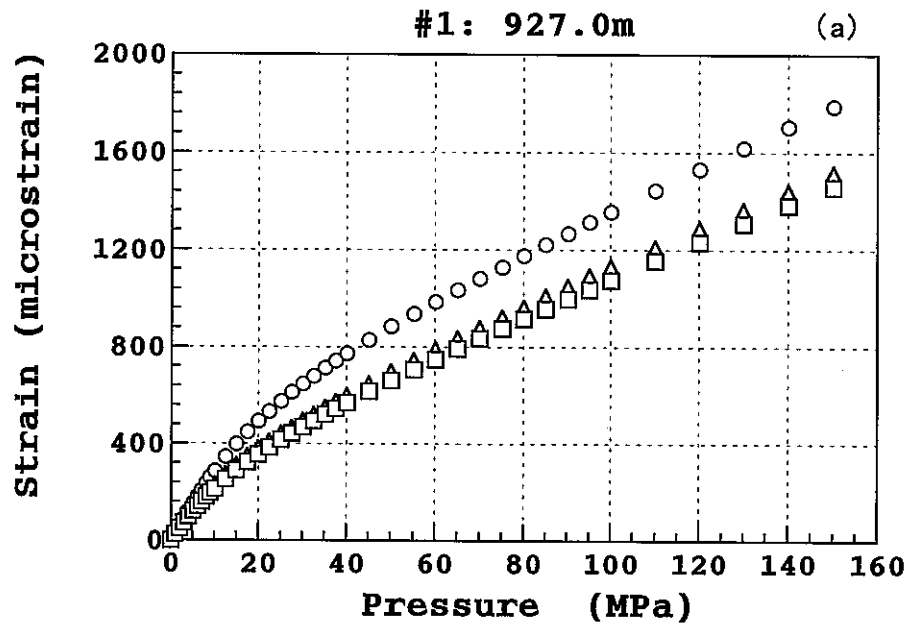


図 6.2.28 試料#1-10の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

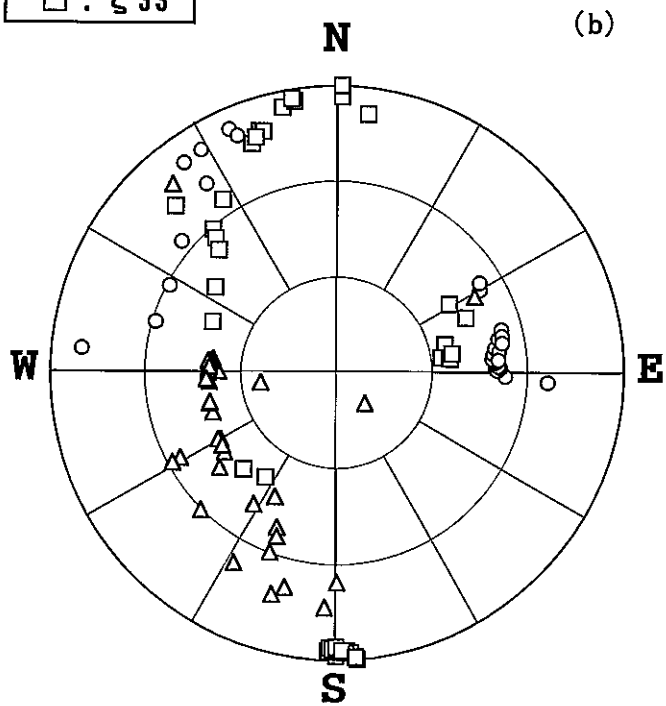
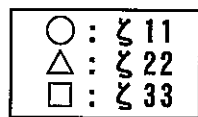
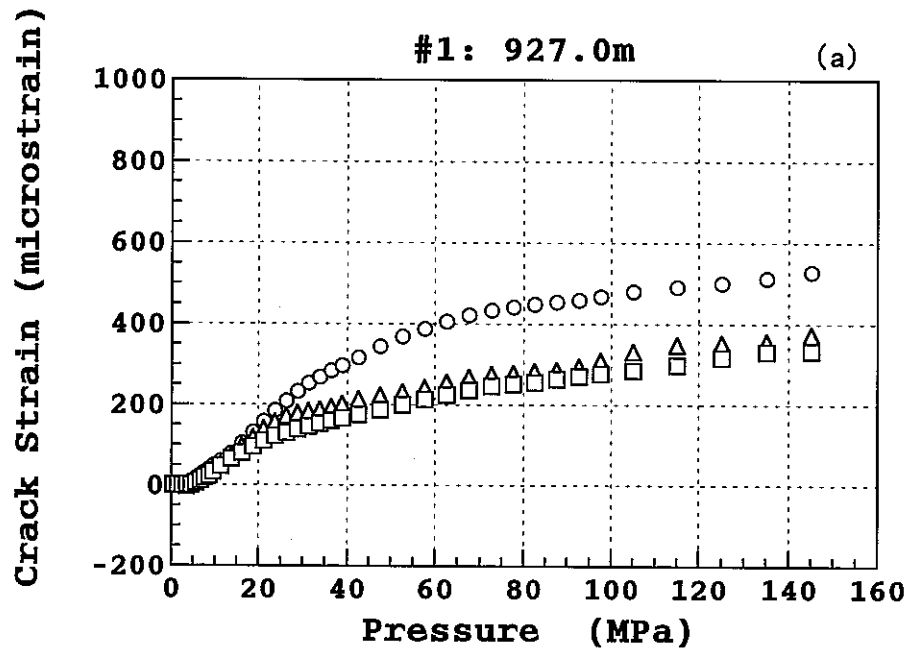
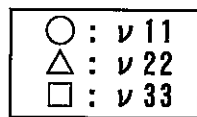
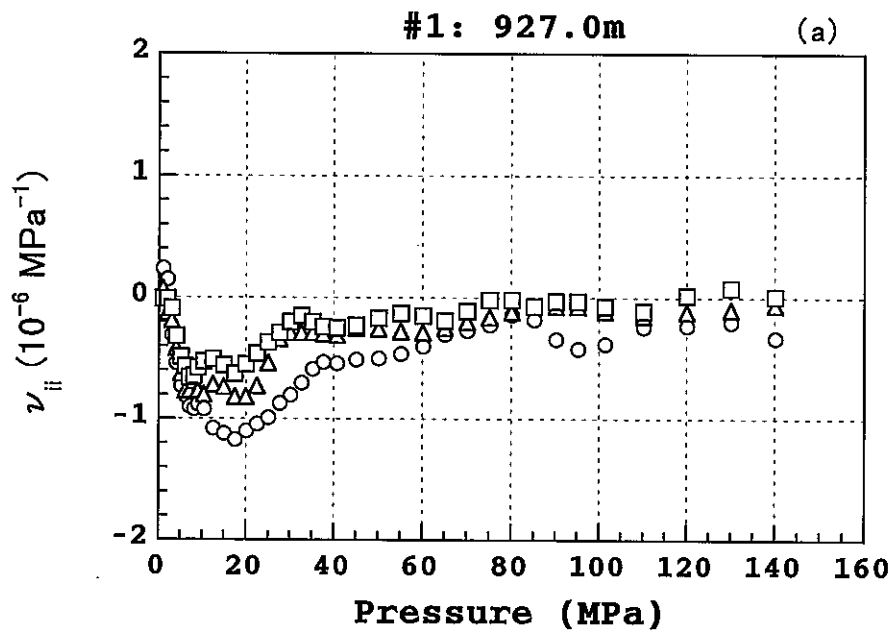


図 6.2.29 試料#1-10のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

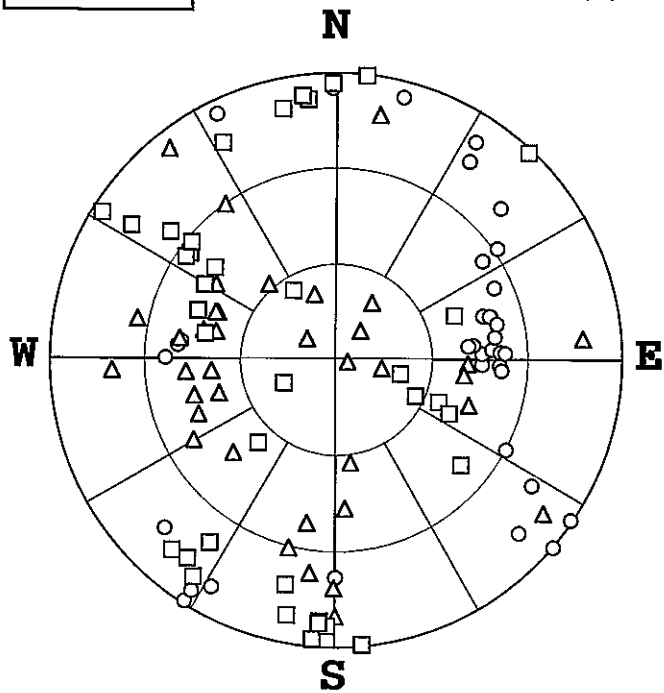


図 6.2.30 試料#1-10の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

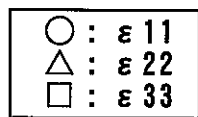
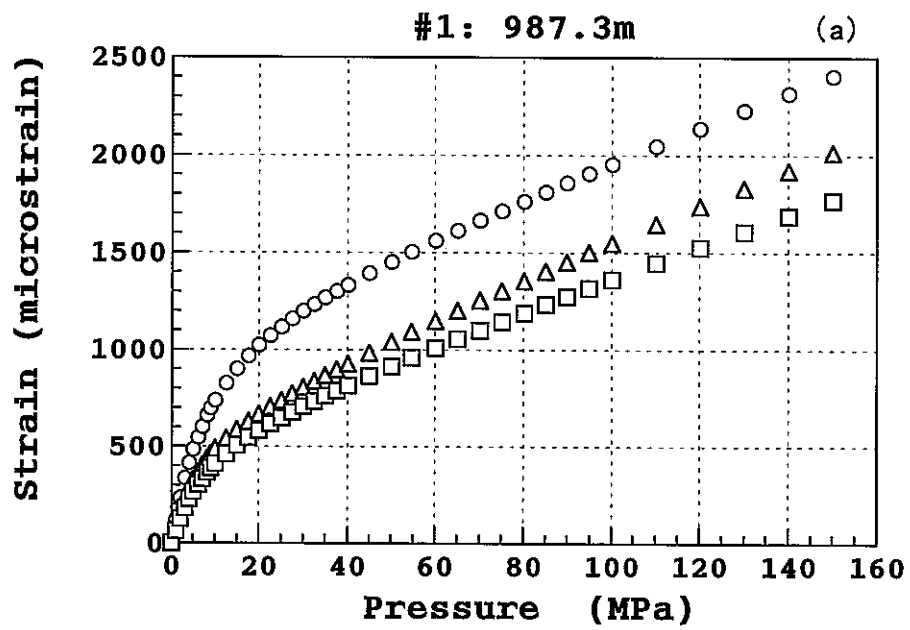
◎ 試料 #1-11(987.3m - 988.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.31~図 6.2.33 に示した。図 6.2.31(a)において, 3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) よりかなり大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ 1052 μstrain , 626 μstrain 及び 551 μstrain となっており, 最大主ひずみ方向のクラックひずみが他方向のクラックひずみの 2 倍に近い値を示している。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は 2229 μstrain である。

図 6.2.31(b)の主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみはほぼ水平面内で, N45W 方向に位置する。また, 中間主ひずみと最小主ひずみはそれぞれ鉛直方向と水平面から約 30° 傾斜している。静水圧負荷に伴う主ひずみ方向の変動はあまり大きくなかった。

図 6.2.32 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっているが, それぞれの大きさを比較すると, ζ_{11} は ζ_{22} と ζ_{33} より約 2 倍となっている。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.33 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.33(a)では静水圧 5MPa に ν_{ii} の明瞭なピークを確認することができる。ピーク値 ν_{11} は約 $55 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ とかなり大きい。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。



N (b)

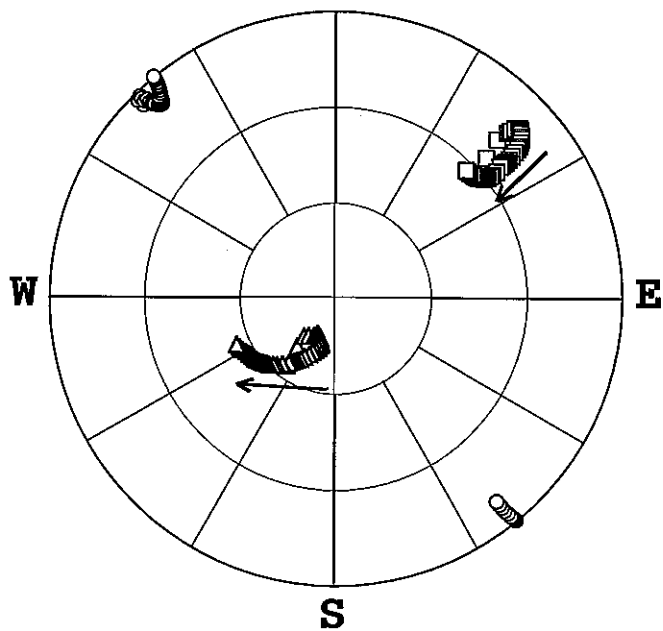


図 6.2.31 試料#1-11の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

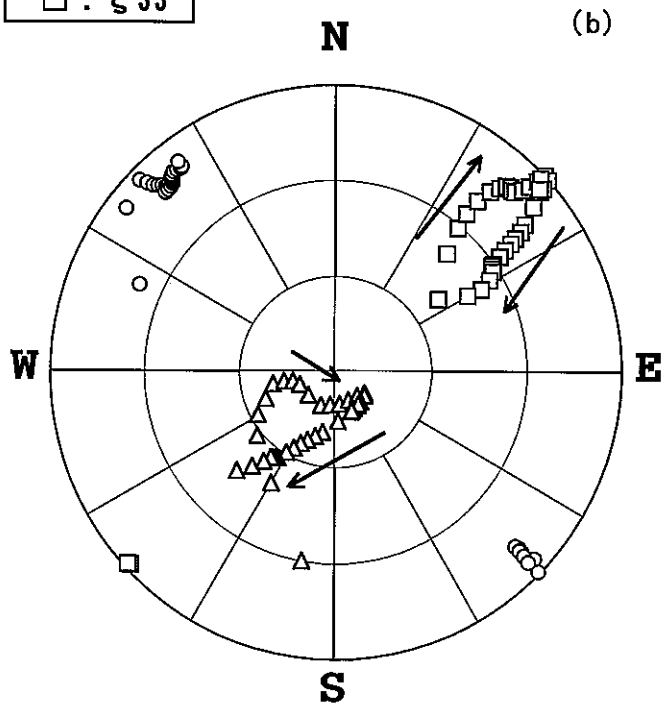
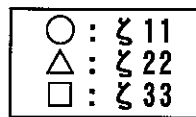
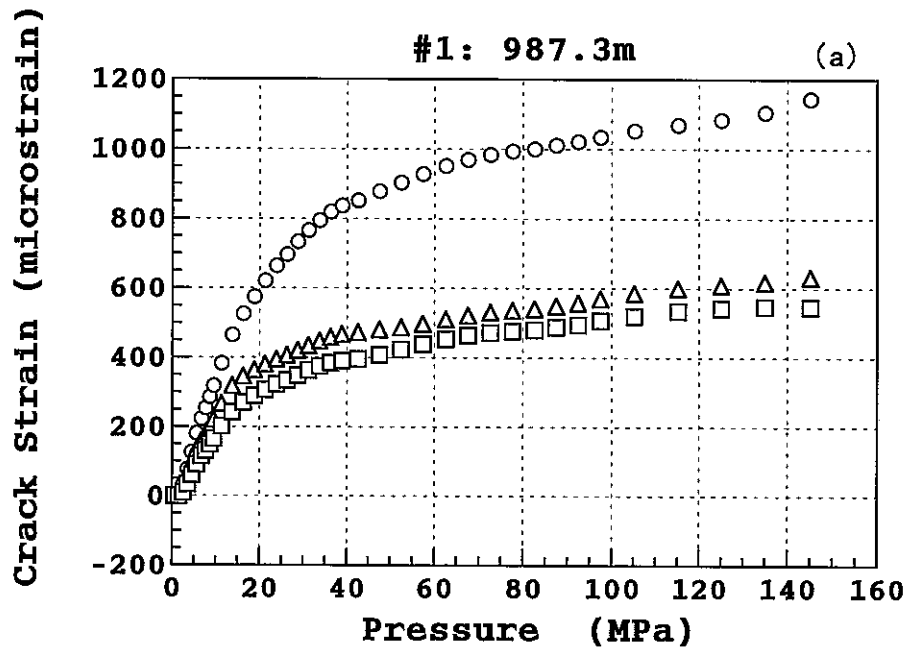
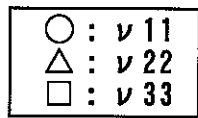
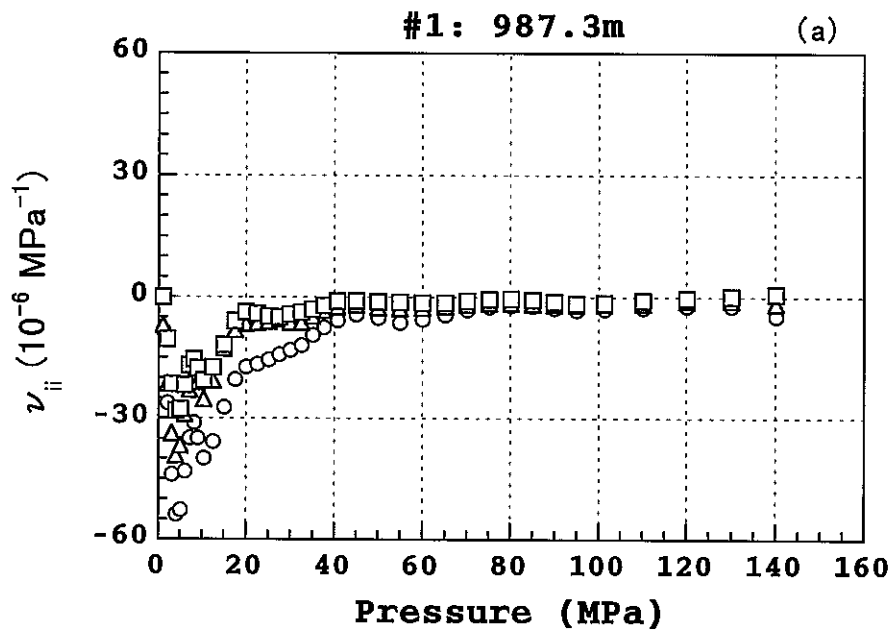


図 6.2.32 試料#1-11のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

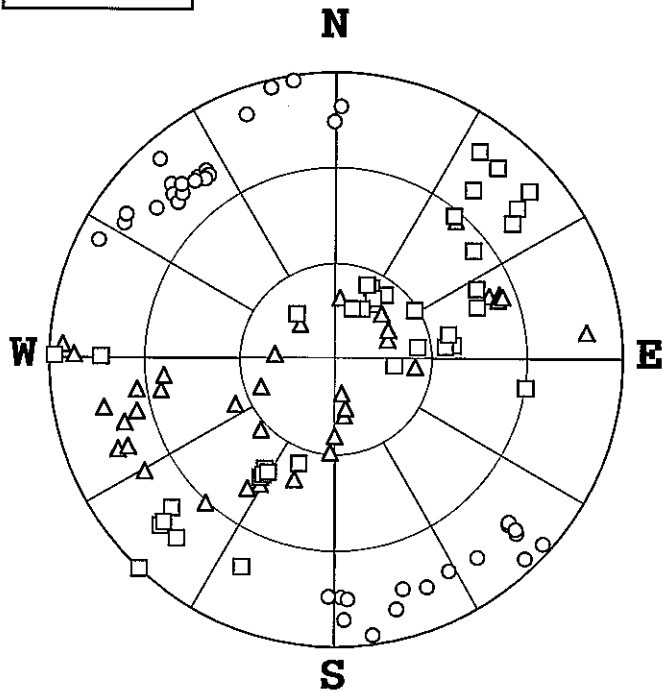


図 6.2.33 試料#1-11の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

6.2.2 MIU-2号孔の試料の試験結果

◎ 試料 #2-1(768.3m - 768.6m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.34～図 6.2.36 に示した。図 6.2.34(a)において, 3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) と中間主ひずみ (△) は近い値を示している。最小主ひずみ (□) も含めてひずみの値は小さい。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $123\mu\text{strain}$, $102\mu\text{strain}$ 及び $56\mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $281\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.34(b)の主ひずみ方向に注目すると, 最小主ひずみの変動幅が最も小さく, 水平面から約 20° 傾斜している。これに対し, 最大主ひずみと中間主ひずみの変動幅はかなり大きい。静水圧 150MPa に達したとき, 両者は水平面からそれぞれ約 30° と 50° 傾斜している。

図 6.2.35 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{22} と ζ_{33} の増加傾向は緩やかになっているが, ζ_{11} はより大きく増加している。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.36 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.36(a)では静水圧 17.5MPa に ν_{ii} のピークを確認することができるが, 明瞭なピークとは言えない。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

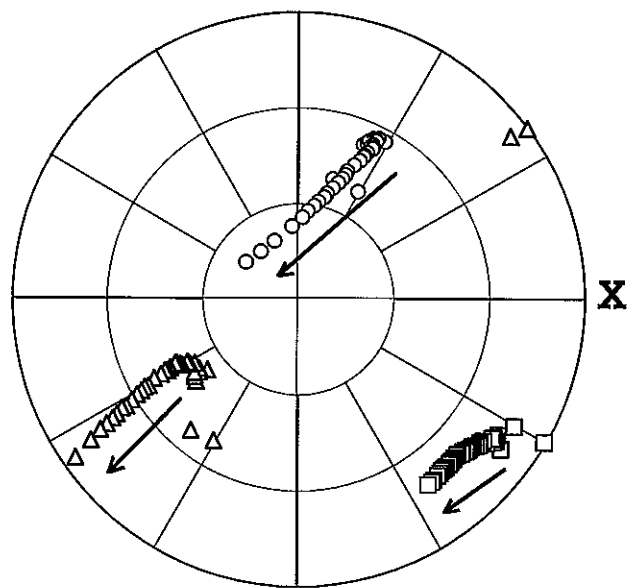
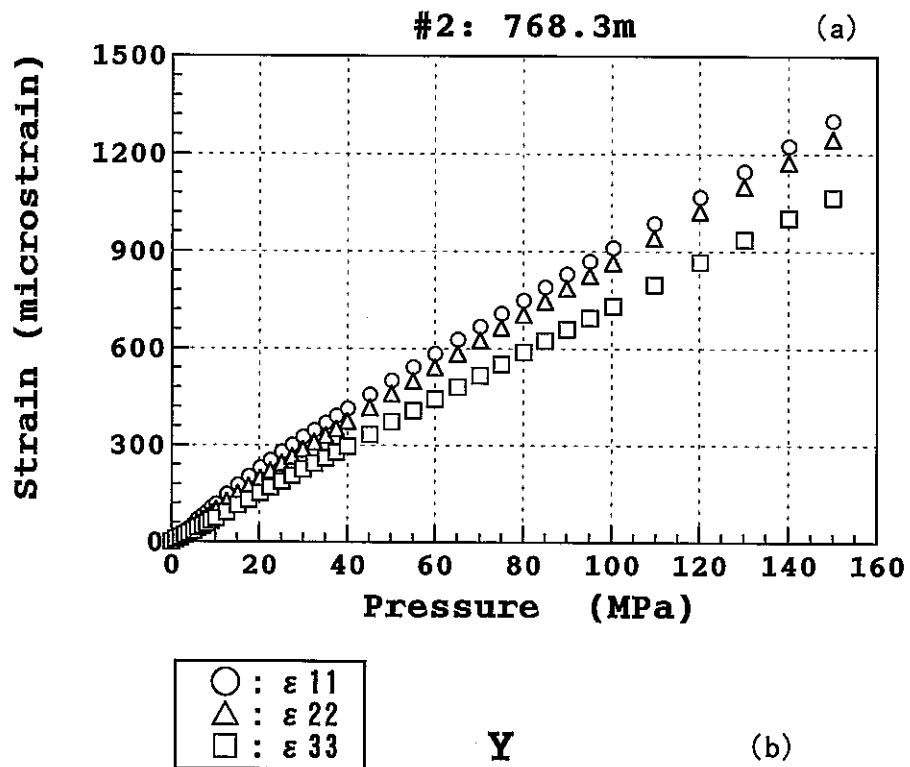


図 6.2.34 試料#2-1の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

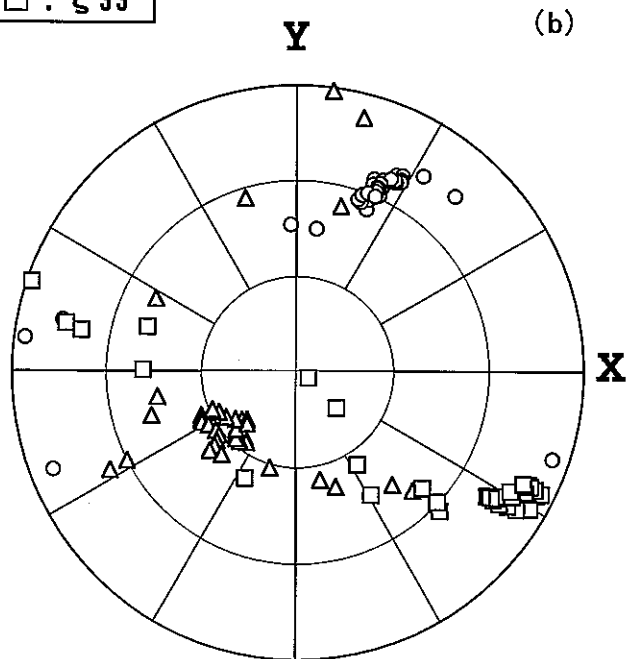
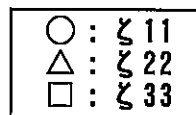
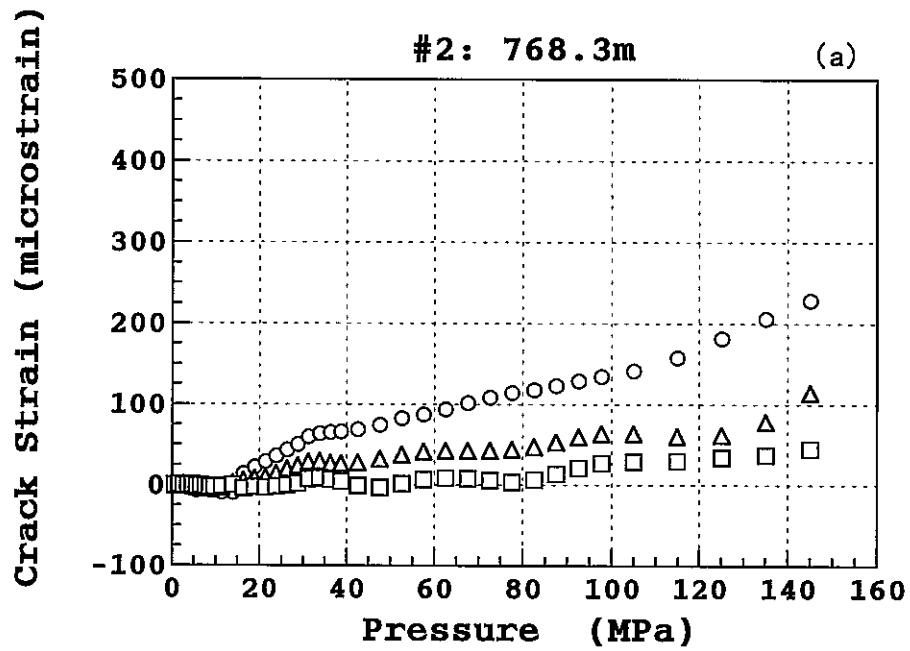
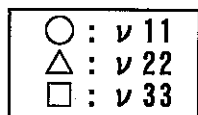
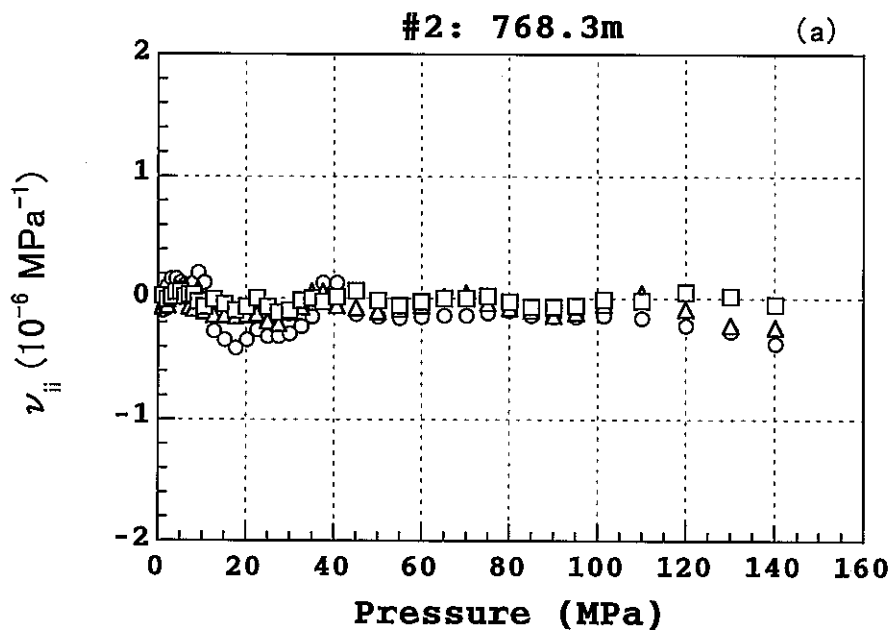


図 6.2.35 試料#2-1のクラックひずみ主値 ξ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

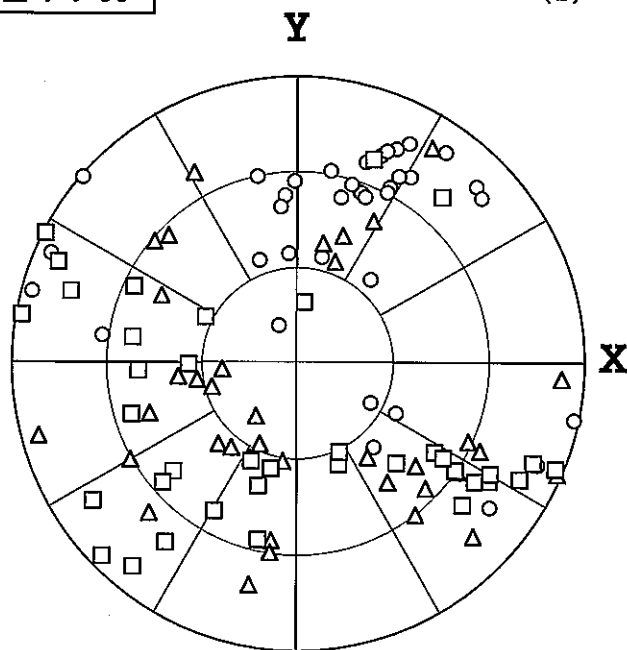


図 6.2.36 試料#2-1の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #2-2(827.0m - 828.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.37~図 6.2.39 に示した。図 6.2.37(a)では3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) が中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) より大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $227\mu\text{strain}$, $150\mu\text{strain}$ 及び $55\mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $432\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.37(b)の主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみと最小主ひずみはほぼ水平面に, 中間主ひずみはほぼ鉛直方向にそれぞれ位置する。静水圧負荷に伴う主ひずみ方向の変動はそれほど大きくなかった。

図 6.2.38 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっている。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.39 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.39(a)では静水圧 15MPa に ν_{ii} のピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

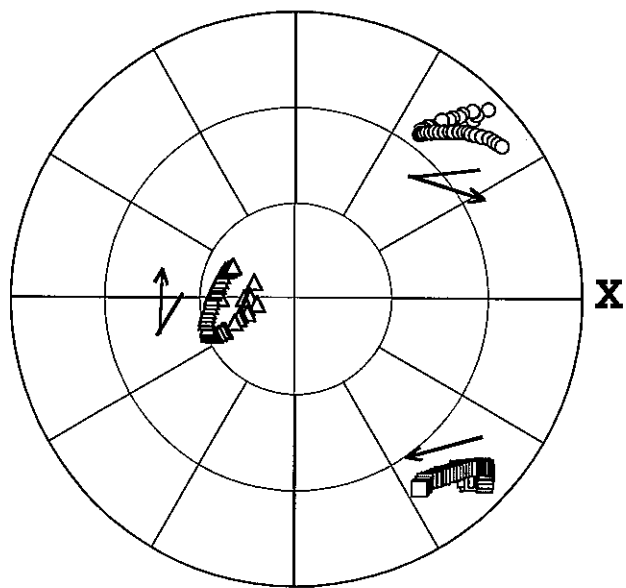
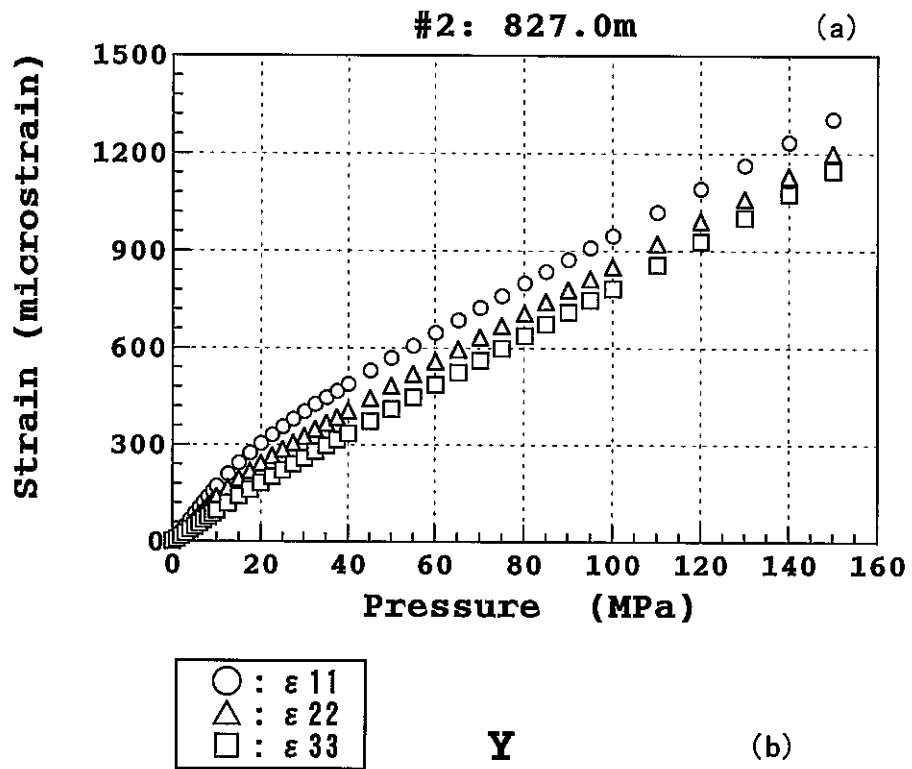


図 6.2.37 試料#2-2の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

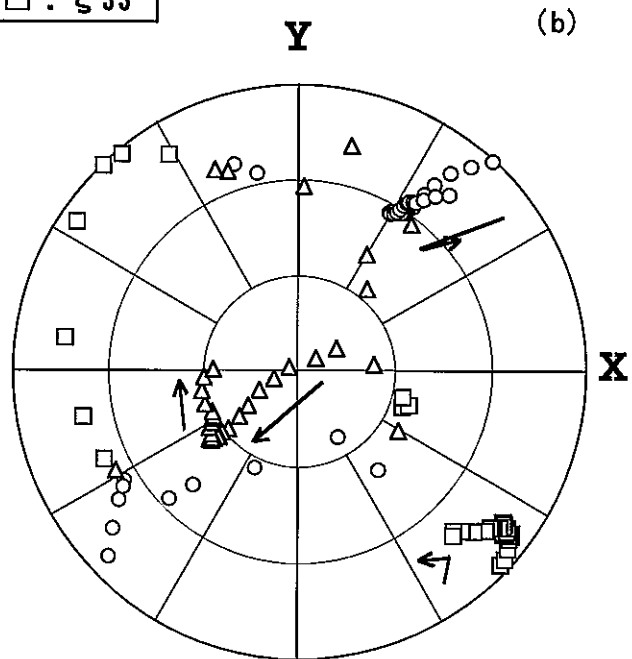
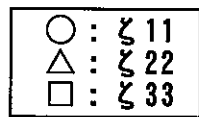
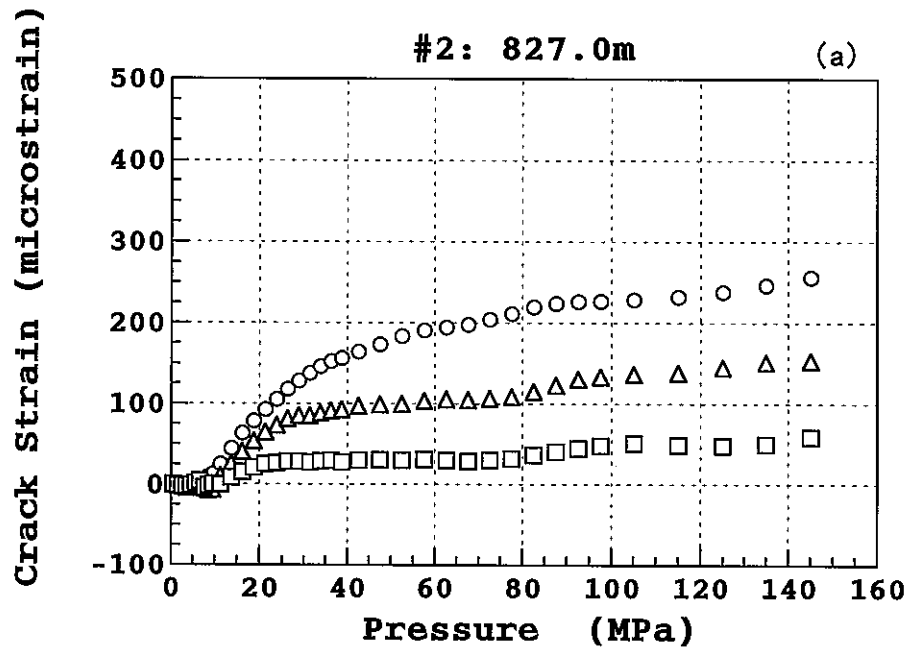
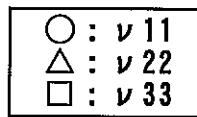
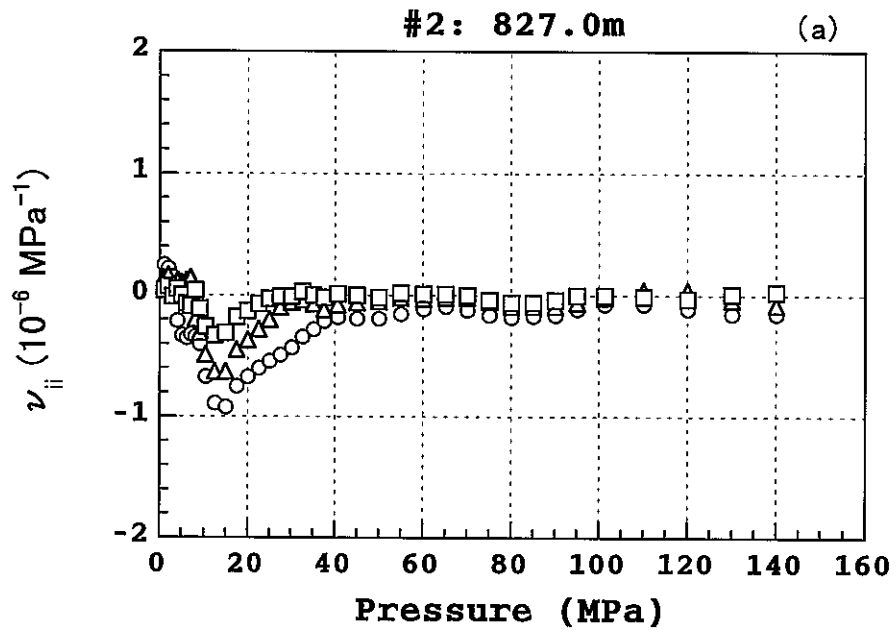


図 6.238 試料#2-2のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

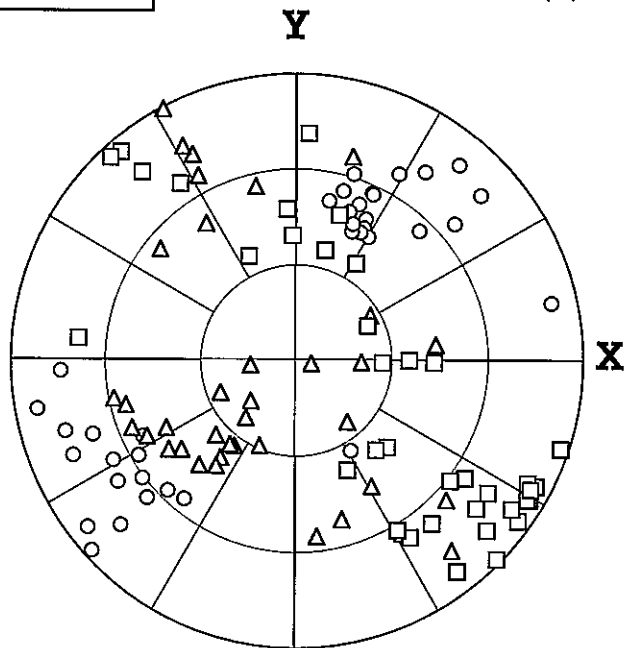


図 6.239 試料#2-2の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #2-3(856.7m - 857.0m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.40～図 6.2.42 に示した。図 6.2.40(a)では3つの主ひずみのうち、最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) より大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は、それぞれ $721\mu\text{strain}$, $485\mu\text{strain}$ 及び $478\mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $1684\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.40(b)の主ひずみ方向に注目すると、最大主ひずみは水平面から約 30° 傾斜するが、主ひずみ方向の変動幅はあまり大きくなかった。これに対し、中間主ひずみと最小主ひずみの方向は大きく変動した。

図 6.2.41 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっている。また、主値 ζ_{ii} の方向については、少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.42 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.42(a)では静水圧 8MPa に ν_{ii} のピークを確認することができる。また、主値 ν_{ii} の方向については、主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

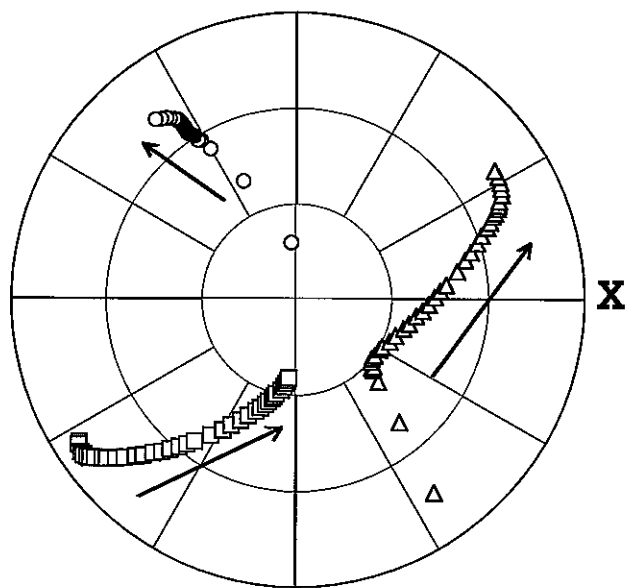
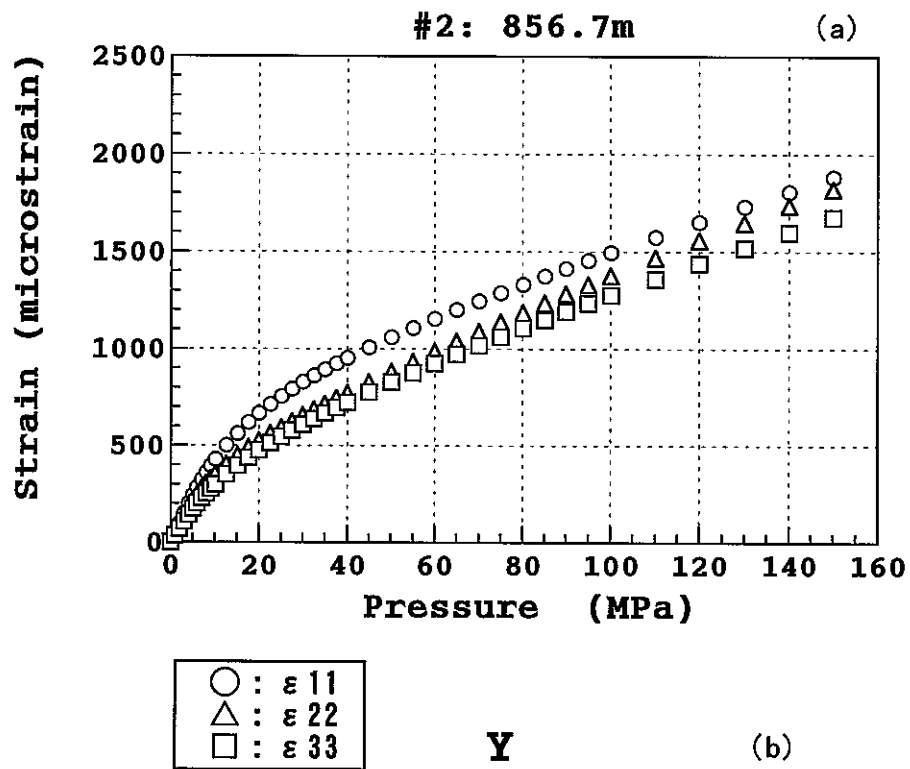


図 6.2.40 試料#2-3の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

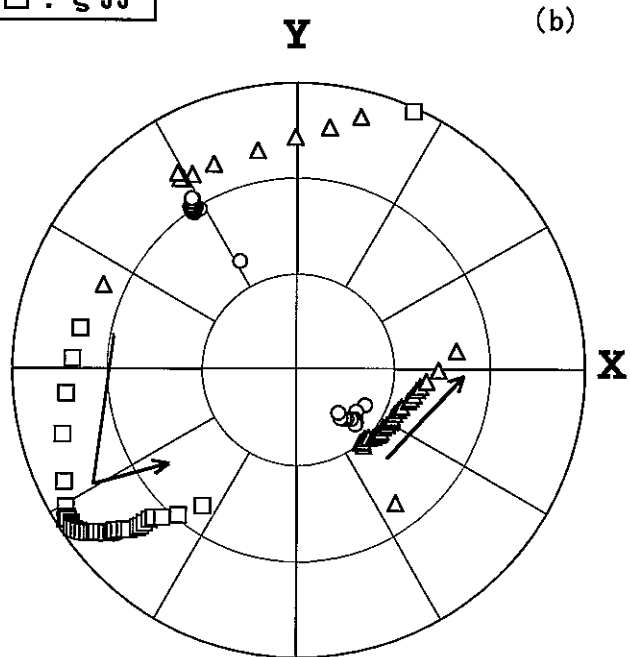
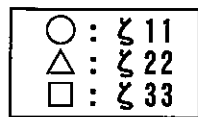
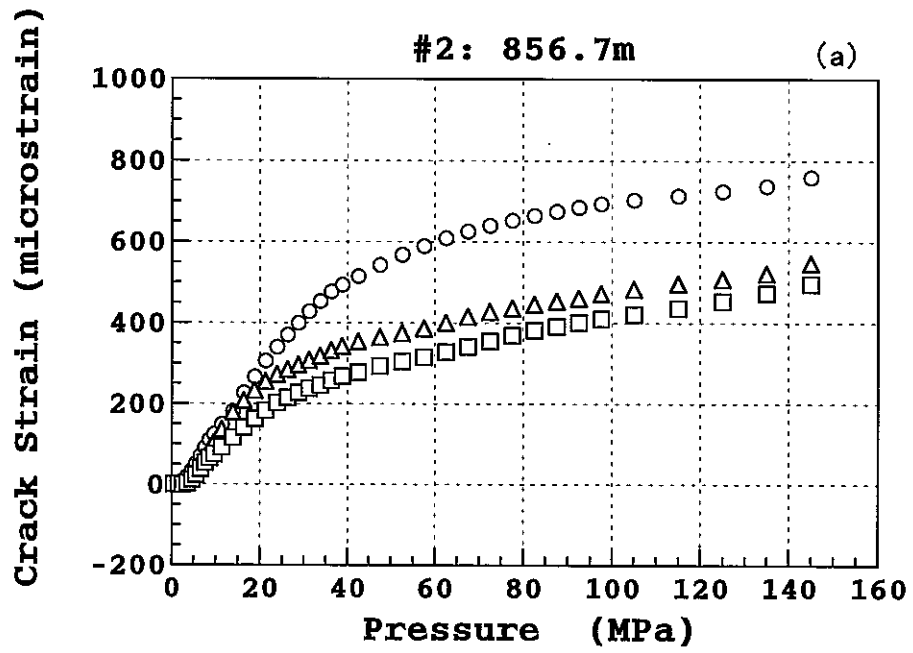
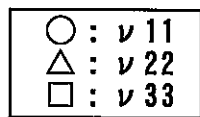
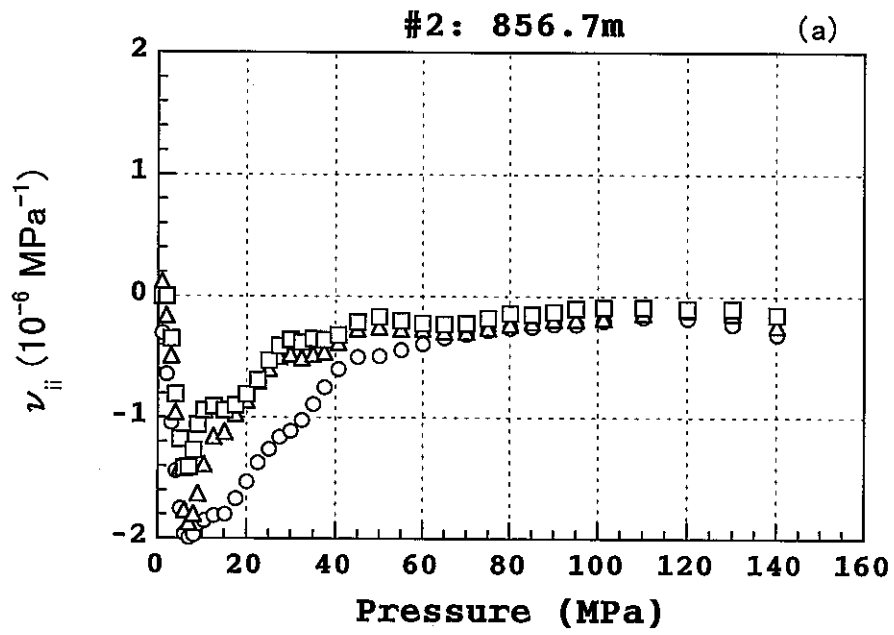


図 6.241 試料#2-3のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)



(b)

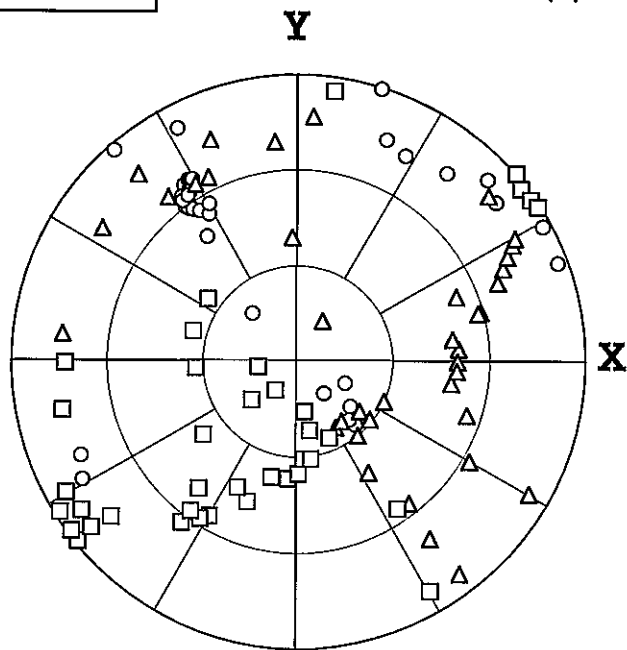


図 6.242 試料#2-3の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

◎ 試料 #2-4(967.1m - 967.3m)について

ひずみ解析で得た主ひずみ ε_{ii} , クラックひずみ主値 ζ_{ii} 及びクラックひずみ主値 ν_{ii} の大きさとその方向をそれぞれ図 6.2.43～図 6.2.45 に示した。図 6.2.43(a)において, 3つの主ひずみのうち, 最大主ひずみ (○) は中間主ひずみ (△) と最小主ひずみ (□) より大きい値を示している。各主ひずみ方向のクラックひずみ (η_o) は, それぞれ $413\mu\text{strain}$, $237\mu\text{strain}$ 及び $196\mu\text{strain}$ となっている。これらのクラックひずみ η_o より求めた試料の crack porosity は $846\mu\text{strain}$ である。

図 6.2.43(b)の主ひずみ方向に注目すると, 最大主ひずみは水平面から約 15° 傾斜するが, 主ひずみ方向の変動幅はあまり大きくなかった。これに対し, 中間主ひずみと最小主ひずみの方向は大きく変動した。

図 6.2.44 はクラックひずみ主値 ζ_{ii} の大きさとその方向を示している。静水圧 40MPa 以降では主値 ζ_{ii} の増加傾向が緩やかになっている。また, 主値 ζ_{ii} の方向については, 少し変動はみられたが主ひずみ ε_{ii} の方向とほぼ一致している。

図 6.2.45 は主値 ν_{ii} の大きさとその方向を示している。図 6.2.45(a)では静水圧 8MPa に ν_{ii} のピークを確認することができる。また, 主値 ν_{ii} の方向については, 主ひずみ ε_{ii} やクラックひずみ主値 ζ_{ii} の方向に比べて変動が大きかった。

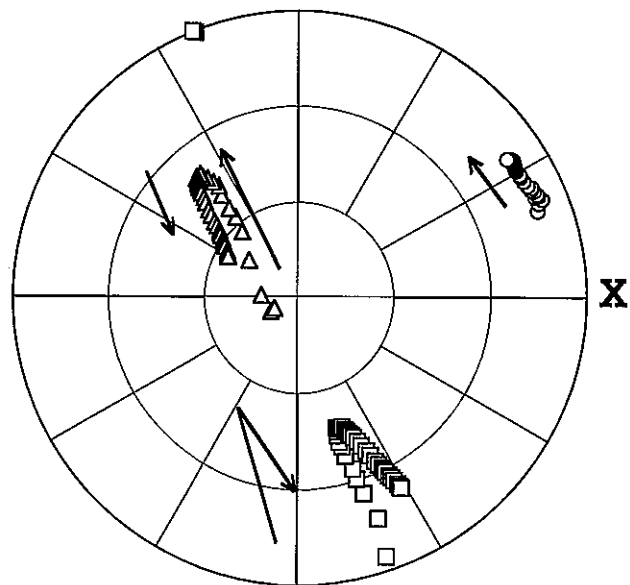
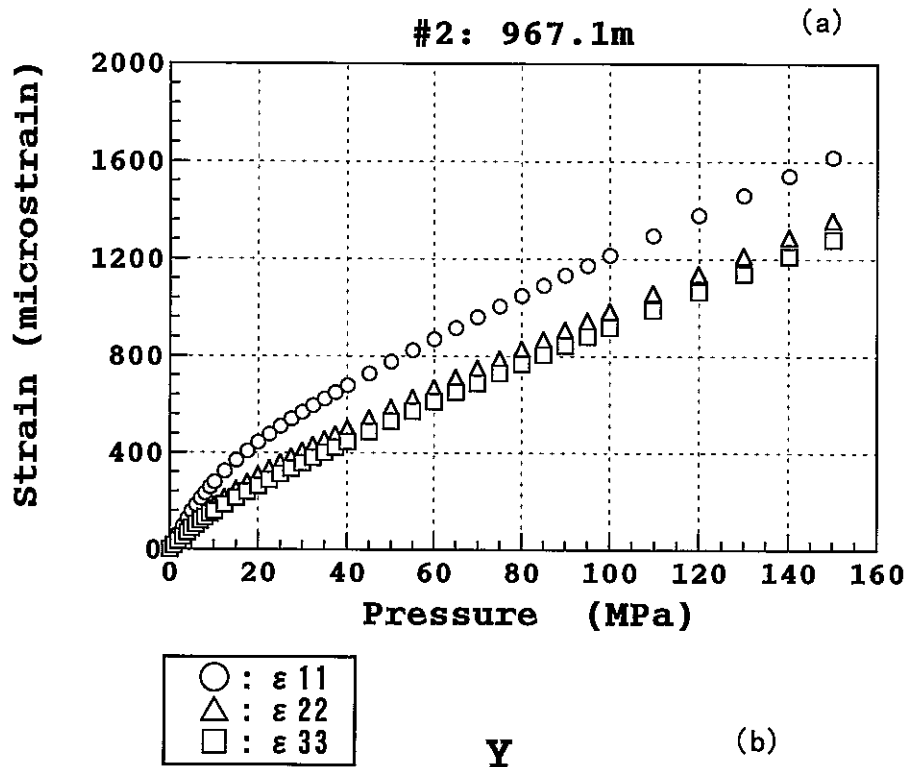


図 6.243 試料#2-4の主ひずみ ϵ_{ii} の大きさとその方向
 (a) 静水圧～主ひずみ曲線 (b) 主ひずみ方向のステレオ表示(上半球)

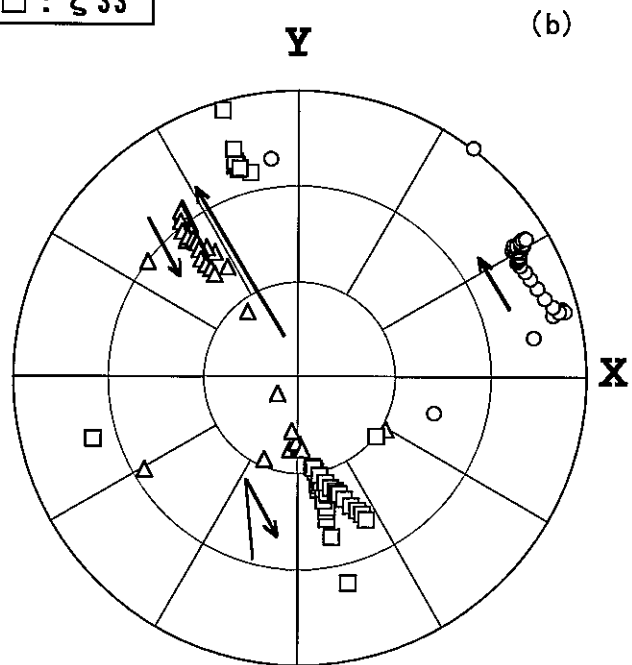
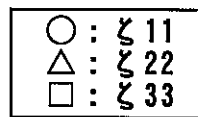
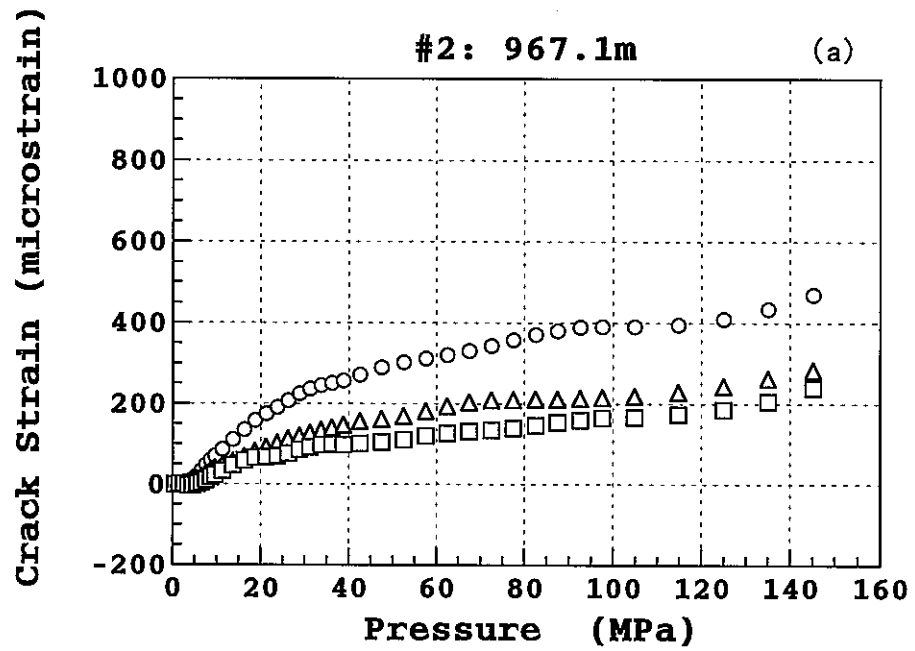


図 6.2.44 試料#2-4のクラックひずみ主値とiiの大きさとその方向
 (a) 静水圧～クラックひずみ主値曲線
 (b) クラックひずみ主値方向のステレオ表示(上半球)

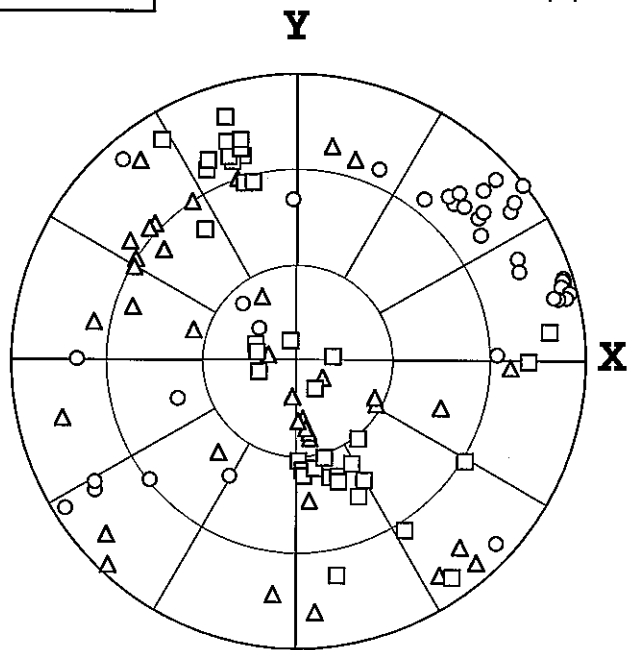
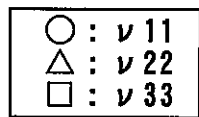
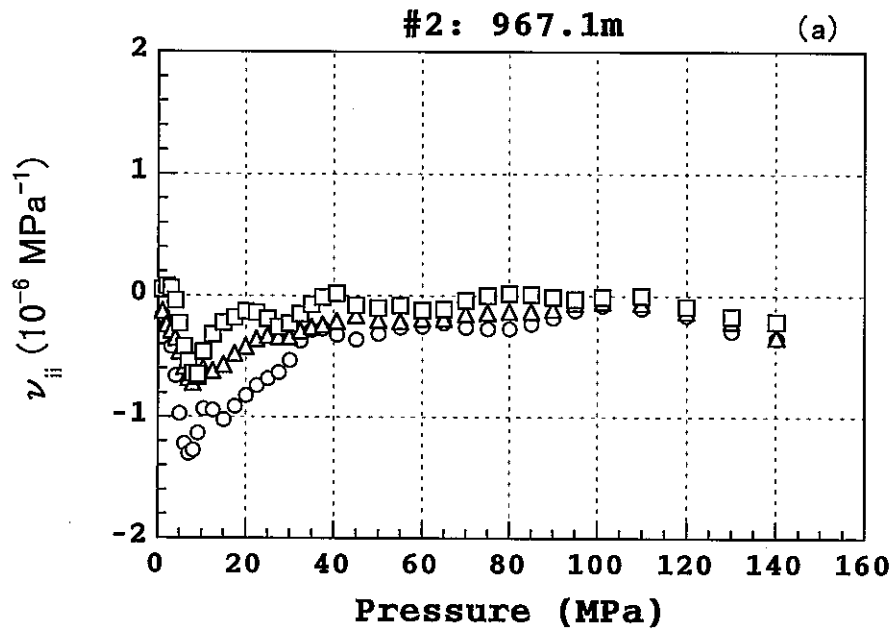


図 6.245 試料#2-4の主値 ν_{ii} の大きさとその方向

(a) 静水圧～主値 ν_{ii} 曲線 (b) 主値 ν_{ii} 方向のステレオ表示(上半球)

MIU-1号孔とMIU-2号孔の各試料の crack porosity 及び静水圧の低圧領域と高圧領域の主ひずみ方向の弾性係数を表 6.1 に示した。MIU-1号孔において、crack porosity は深度 509m までに単調な増加傾向が認められたが、509m を境に値が急に小さくなり、それ以深では同様な増加傾向が繰り返された。また、実験数量が少なかった MIU-2号孔でも深度と crack porosity との間に同様な関係が認められた。

一方、弾性係数に注目すると、静水圧の高圧領域ではいずれの試料もほぼ同様な値を示している。しかし、静水圧の低圧領域での弾性係数では明らかな差異が現れた。深度方向の弾性係数は、509m を境にそれ以浅とそれ以深の区間で単調な減少傾向を示している。

7. 考察

7.1 試料内部のクラックと深度の関係

ボーリングコアの crack porosity, 弾性波速度及び透水係数は, コア内部のクラックの量や分布特性と密接に関係する。一般的に, コアの採取深度が深くなると, crack porosity と透水係数は増加し, 弾性波速度は減少する(Kowallis and Wang,1983; Morrow et al.,1994; Morrow and Lockner,1997)。これは深いところのコアほど, 応力解放によって生じたクラックをより多く含むためと考えられている。応力解放の際にクラックが発生することは, 地上に回収された直後のコアが示す非弾性ひずみ(時間依存性のひずみ)や AE(Acoustic Emission)によって裏付けられている(Wolter and Berckhemer,1989)。本業務では crack porosity を用いて, 試料内部のクラックの量を評価している。

MIU-1 号孔の各試料の crack porosity をみると, 深度方向に crack porosity の単調な増加傾向は認められず, 深度 510m 付近を境界に, 単調な増加を繰り返している。同様な現象は試験数量が少ない MIU-2 号孔でも確認することができる。このようにコア試料の crack porosity が不連続的に変化することは, Carlson and Wang(1986)によっても報告されている。その原因について, 彼らは試料採取深度のきれつ密度との関連性を指摘した。MIU-1 号孔と MIU-2 号孔は月吉断層に近接するため, 断層破碎帯の規模やボーリングコアのき裂密度を示す RQD (Rock Quality Designation) を考慮にした上での原因究明が必要と考えられる。

DSCA 試験では試料に含まれるすべてのクラックを評価の対象にしているが, Kranz(1983)の報告によると, 岩石内部のクラックの成因をはじめ, 大きさや分布形態は極めて複雑である。花崗岩試料では応力解放によるクラックのほか, 癒着クラック(healed crack)の存在がしばしば指摘される(例えば, Ren et al.,1986)。佐野教授が提案したギャップ法では, 主値 v_{ii} のピークを基に複数のクラック系を分離することが可能とされている。ひずみ解析で得られる静水圧～主値 v_{ii} 曲線に現れる v_{ii} のピークは, 試料内部のクラック系の存在を示している。今回の測定に用いた 15 個の試料のうち, 13 個の試料では静水圧 20MPa 付近にある 1 つのピークしか確認できなかったが, MIU-1 号孔の試料 #1-1 と #1-8 では静水圧 10MPa と 20MPa 付近にそれぞれピークが現れている。また, 興味深いことに, すべての試料が静水圧 20MPa 付近に v_{ii} ピークをもっている。これは, 各試料にその圧力で閉鎖するアスペクト比のクラックが卓越して存在することを示していると考えられる。

7.2 主ひずみ方向の変動と DSCA 法の適用性

静水圧の負荷に伴って主ひずみの方向が変動する現象はしばしばみられる。その原因についてはまだよくわかっていないが、試料に含まれる癒着クラックや既存割れ目が主ひずみ方向の変動に関係すると考えられている。癒着クラックの方向性は過去の応力履歴を反映するものであるため、現在の応力場の主応力方向とのずれが認められる(Engelder,1984; 1986; Kowallis et al.,1987)。また、既存割れ目を含む試料では、主ひずみ方向が変動するだけでなく、既存割れ目の方向性を反映する結果となってしまう恐れがある(長・薛, 2000)。一般的に、試料内部のクラック形態が複雑ほど、主ひずみ方向が変動しかつ変動幅が大きくなると考えられる。

今回の測定試料では、肉眼で確認できる既存割れ目は認められなかった。しかし、MIU-1号孔の試料#1-1と#1-8でみられた主値 ν_{ii} の2つのピークを考えると、異なる大きさのアスペクト比をもつ2つクラック系が存在する可能性がある。ほかの試料で明瞭なピークが現われていないのは、そのようなクラックは存在するが、主値 ν_{ii} のピークが現れるほど卓越していなかったためと思われる。

つぎに、地下応力測定法としてDSCA法の適用性について考える。DSCA法の適用性を論じるに当たっては、まず同手法における3つの前提条件について検討する必要がある。一つ目の前提条件は、応力解放によって主応力方向と直交してクラックが発生することである。この考えの妥当性はこれまでに報告された幾つかの測定結果によって明らかになっている。例えば、Engelder and Plumb(1984)はボーリング直後、岩盤から切り取っていない状態の花崗岩コアのP波速度を測定した。その結果によると、最大主応力方向のP波速度が最も大きく減衰し、その減衰率は解放される応力の大きさに比例することがわかった。また、薛ら(1998)は流紋岩を用いたASR(Anelastic Strain Recovery)試験において、最大主応力方向と直交する方向にある円周方向のゲージが最も大きいひずみを得ていたと報告している。これらの研究事例により、この仮定は一般的に成り立つものと考えられる。

二つ目の前提条件は、先在クラックなどによるひずみへの影響は、応力解放によって生じたクラックに比べて無視できるほど小さいことである。ひずみ解析で得られる静水圧～主値 ν_{ii} 曲線に現れる ν_{ii} のピークを利用すれば、支配的なクラック系を知ることができる。さらに、薛ら(1998)が提唱したように、同一試料を対象にASR試験とDSCA試験をともに実施し、得られた主ひずみの結果を比較することにより結果の信頼性を高めることができる。即ち、静水圧～主値 ν_{ii} 曲線に複数の ν_{ii} のピークが現れた場合、ASR試験の結果と一致するものを選び出すことができる。このように試料内部のクラック形態を調べることは試験結果を解釈する上で極めて重要である。

三つ目の前提条件は、地下深部において岩石は等方均質とみなすことである。表6.2に示した静水圧100MPa以降の弾性係数をみると、各試料とも3つの主ひずみ方向の弾性係数がほぼ同じ値を示していることがわかる。この結果は3つ目の前提条件の妥当性を強く示唆していると考えられる。

以上の検討により、本測定において DSCA 法的前提となる 3 つの仮定ともほぼ成り立っていると推定される。また、今回の DSCA 試験で得た主ひずみの方向が、MIU-1 号孔や MIU-2 号孔で実施された水圧破碎法の結果とほぼ一致しており、結晶質岩において DSCA 法が応力測定に適していることが示されたと考える。

8. 結論

ボーリング孔 MIU-1 及び MIU-2 のコアより採取した岩石試料に DSCA 法を適用し、得られた主ひずみの大きさ及びその方向を基に、岩石試料のクラック異方性及びクラックの3次元分布特性について検討した。その結果によると、MIU-1 号孔では最大主ひずみと中間主ひずみがほぼ水平面に、最小主ひずみはほぼ鉛直方向にそれぞれ位置する。3つの主ひずみ ϵ_{ii} の方向は、クラックひずみ主値 ϵ_{ii} 及び単位圧力当たりのクラックひずみ主値 ν_{ii} の方向とほぼ一致する。試料によっては最大主ひずみ方向の変動がみられたが、その変動幅は約 30 度程度である。

試料の crack porosity と低圧領域の弾性係数が 509m を境に単調な増加を繰り返している。これは MIU-1 号孔及び MIU-2 号孔と近接する月吉断層による影響と考えられる。静水圧～主値 ν_{ii} 曲線において、主値 ν_{ii} の1つの明瞭なピークを示す試料が多く、試料内部に卓越して存在するクラック系がある。

静水圧下での精密なひずみ測定より、岩石試料に含まれるクラックの大きさや分布方向を把握するのに、DSCA 法が効果的である。また、ひずみ解析で得られた主ひずみの方向が水圧破碎試験の結果とほぼ一致するため、DSCA 法は結晶質岩における地下応力測定法として有効な試験法といえよう。

表 6.1 主ひずみ方向のクラックひずみ及び弾性係数

孔番	深度 (m)	η_0				弾性係数 ¹⁾ $E_L (\times 10^5 \text{MPa})$			弾性係数 ²⁾ $E_H (\times 10^5 \text{MPa})$		
		$\eta_0(11)$	$\eta_0(22)$	$\eta_0(33)$	$\eta_0(\text{vol})$	$E_L(11)$	$E_L(22)$	$E_L(33)$	$E_H(11)$	$E_H(22)$	$E_H(33)$
#1-1	192.1 - 192.8	411.96	208.83	117.40	738.19	0.37	0.60	0.73	1.27	1.47	1.43
#1-2	292.6 - 293.0	162.78	246.69	83.80	493.27	0.52	0.52	0.91	1.13	1.42	1.48
#1-3	413.0 - 413.9	635.40	328.62	260.05	1224.07	0.29	0.46	0.52	1.22	1.35	1.38
#1-4	509.5 - 510.0	603.78	331.30	165.06	1100.14	0.25	0.43	0.78	1.18	1.33	1.44
#1-5	582.2 - 582.8	387.45	120.05	103.56	611.06	0.47	0.74	0.98	1.33	1.41	1.40
#1-6	586.4 - 587.0	295.44	174.73	101.13	571.30	0.51	0.68	0.86	1.26	1.37	1.43
#1-7	677.0 - 677.9	287.61	177.62	138.61	603.84	0.55	0.71	0.83	1.32	1.37	1.40
#1-8	751.4 - 752.0	407.93	328.70	185.33	921.96	0.35	0.49	0.63	1.25	1.33	1.43
#1-9	802.0 - 802.9	533.68	359.05	199.28	1092.01	0.26	0.42	0.56	1.22	1.39	1.52
#1-10	927.0 - 927.7	490.71	358.55	312.94	1162.20	0.33	0.41	0.44	1.15	1.30	1.31
#1-11	987.3 - 988.0	1051.70	626.07	551.40	2229.17	0.10	0.14	0.17	1.11	1.08	1.23
#2-1	768.3 - 768.6	123.27	101.74	56.32	281.33	0.85	1.02	1.41	1.27	1.31	1.48
#2-2	827.0 - 828.0	226.74	149.95	54.85	431.54	0.57	0.71	1.07	1.39	1.43	1.37
#2-3	856.7 - 857.0	720.49	485.35	478.12	1683.96	0.22	0.25	0.31	1.29	1.12	1.25
#2-4	967.1 - 967.3	413.14	237.03	196.02	846.19	0.33	0.52	0.58	1.24	1.34	1.38

¹⁾ 圧力がおよそ0~7MPaのデータを採用

²⁾ 圧力がおよそ100~150MPaのデータを採用

参考文献:

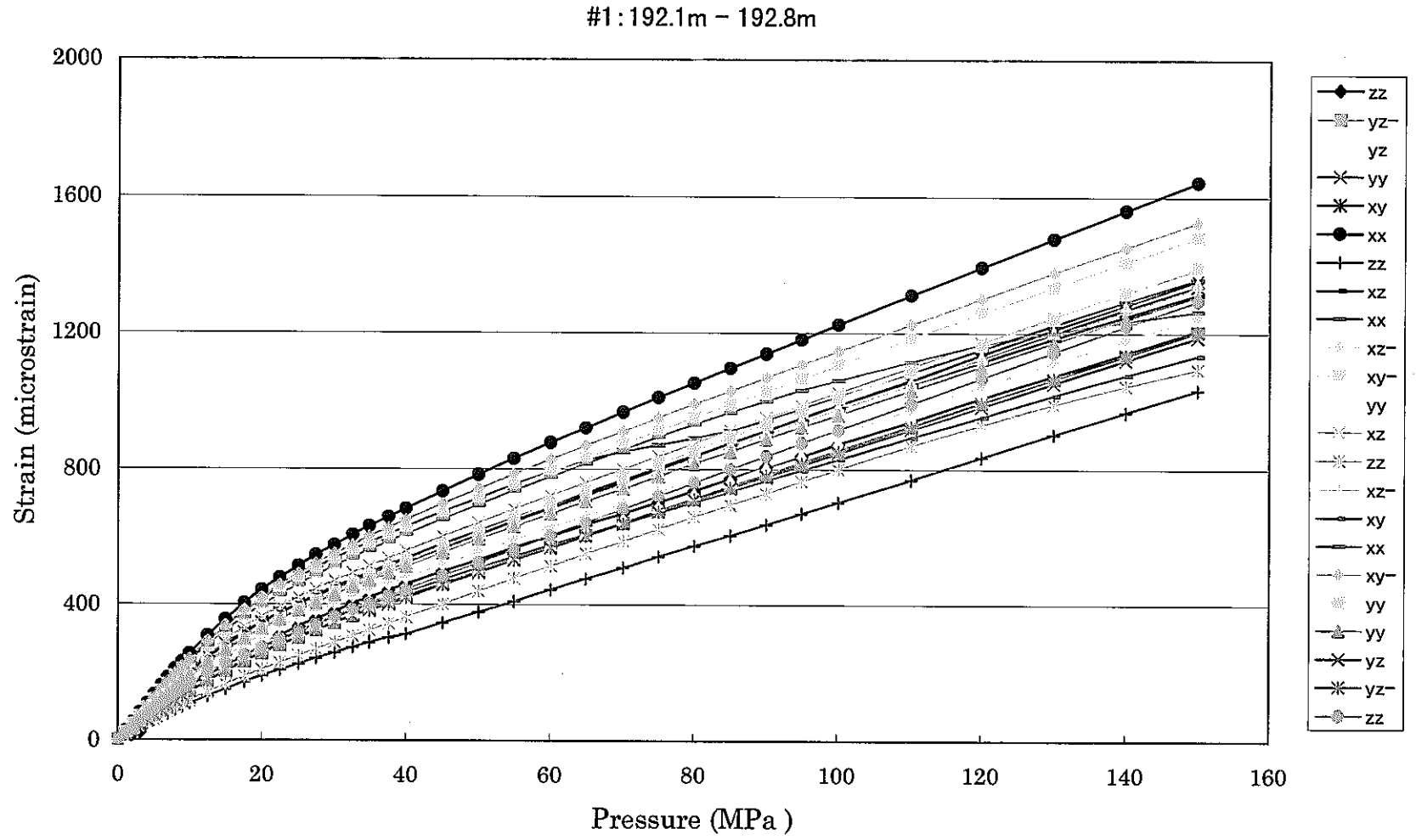
1. Carlson, S.R. and H.F.Wang: Microcrack porosity and in situ stress in Illinois borehole UPH-3, *J.Geophys. Res.*, Vol.91, pp.10,421-10,428, 1986
2. 長秋雄・薛自求: つくば観測井での地下応力測定, 応用地質, 印刷中, 2000
3. Dey, T.N. and D.W. Brown: Stress measurements in a deep granitic rock mass using hydraulic fracturing and differential strain curve analysis, *Proc. Int. Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements*, pp.351-357, 1986
4. Engelder, T.: The time-dependent strain relaxation of Algeria granite, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, pp.63-73, 1984
5. Engelder, T. and R.Plumb: Changes in in situ ultrasonic properties of rock on strain relaxation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, No.2, pp.75-82, 1984
6. Kowallis, B.J., H.F.Wang and B-A.Jang: Healed microcrack orientations in granite from Illinois borehole UPH-3 and their relationship to the rock's stress history, *Tectonophysics*, Vol.135, pp.297-306, 1987
7. Kowallis, B.J. and H.F.Wang: Microcrack study of granitic cores from Illinois Deep Borehole UPH-3, *J.Geophys. Res.*, Vol.88, pp.7373-7380, 1983
8. Kranz, R.L.: Microcracks, a review, *Tectonophysics*, Vol.100, pp.449-480, 1983
9. Morrow, C.A. and D.A.Lockner: Permeability and porosity of the Illinois UPH-3 drillhole granite and a comparison with other deep drillhole rocks, *J.Geophys. Res.*, Vol.102, pp.3067-3075, 1997
10. Morrow, C., D.Lockner, S.Hickman, M.Rusanov and T.Rockel: Effects of lithology and depth on the permeability of core samples from the Kola and KTB drill holes, *J.Geophys. Res.*, Vol.99, pp.7263-7274, 1994
11. Morlier, P.: Description de l'état de fissuration d'une roche a partir d'essais non-destructifs simples, *Rock Mechanics*, Vol.3, pp.125-138, 1971
12. 及川寧己・山口勉・松永烈・佐藤嘉晃: DSCA による肘折高温岩体実験場の地圧評価, 資源と素材, Vol.111, No.9, pp.7-14, 1995
13. Ren, N.K. and J.C.Roegiers: Differential strain curve analysis, a new method for determining the pre-existing in-situ stress state from rock core measurements, 5th *Int. Congr. ISRM*, pp.F117-127, 1983
14. Ren, X., B.J.Kowallis, B-A,Jang and H.F. Wang: Regional paleostress directions recorded by granites of the Midcontinent. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, Vol.67: p.382, 1986
15. 佐野修: DSCA 法の検討を目的としたきれつ分布評価に関する研究, 平成5年度科学補助金研究成果報告書, pp.130-141, 1994

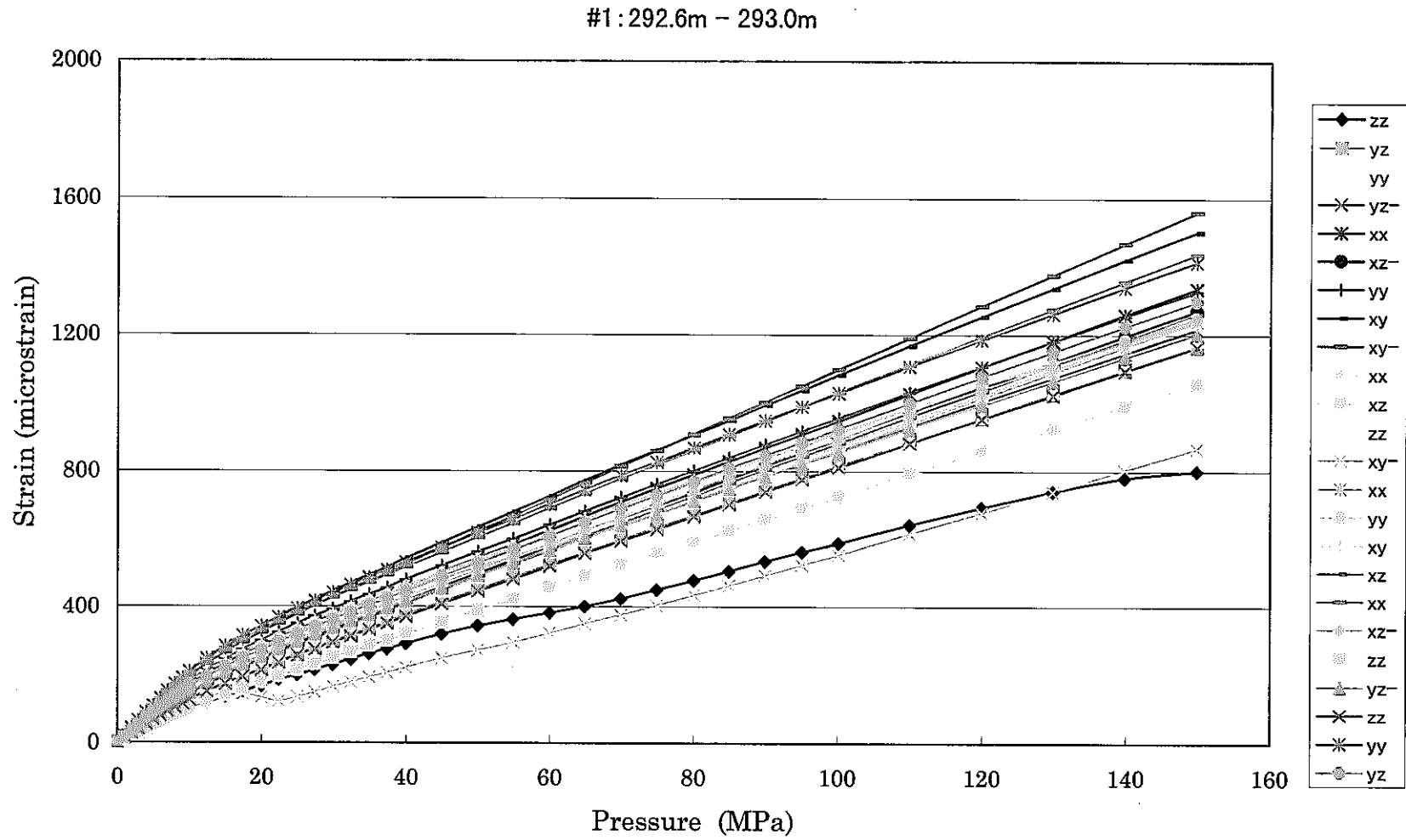
16. 佐野修・西澤修・山口勉・水田義明: ボーリングコアを用いた DSCA 法による岩盤応力測定について, 資源・素材学会秋季大会分科会資料, N6, pp.21-24, 1990
17. Siegfried, R. and G. Simmons: Characterization of oriented cracks with differential strain analysis, J. Geophys. Res., Vol.83, pp.1269-1278, 1978
18. Simmons, G., R. Siegfried, M. Feves: Differential strain analysis, a new method for examining cracks in rocks, J. Geophys. Res. Vol.79, pp.4383-4385, 1974
19. Strickland, F.G. and N. Ren: Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state for deep wells, Proc. 21st US Symp. on Rock Mech., pp.523-532, 1980
20. Strickland, F.G. and N.K. Ren: Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state for deep wells, Proc. 21th U.S. Symposium on Rock Mech., pp.523-532, 1980
21. 薛自求・伊藤久男・西澤修・佐野修: ASR 法と DSCA 法による地下応力の測定について, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.671-676, 1998
22. 山口勉・及川寧己・佐藤嘉晃・厨川道雄・天満則夫・小林秀男・松永烈: DSCA による原位置応力の推定に関する実験的研究, 資源・素材学会誌, Vol.107, No.7, pp.434-440, 1991
23. Wolter, K.E. and H. Berckhemer: Time dependent strain recovery of core from the KTB deep drill hole, Rock Mech. and Rock Eng. Vol.22, pp.273-287, 1989

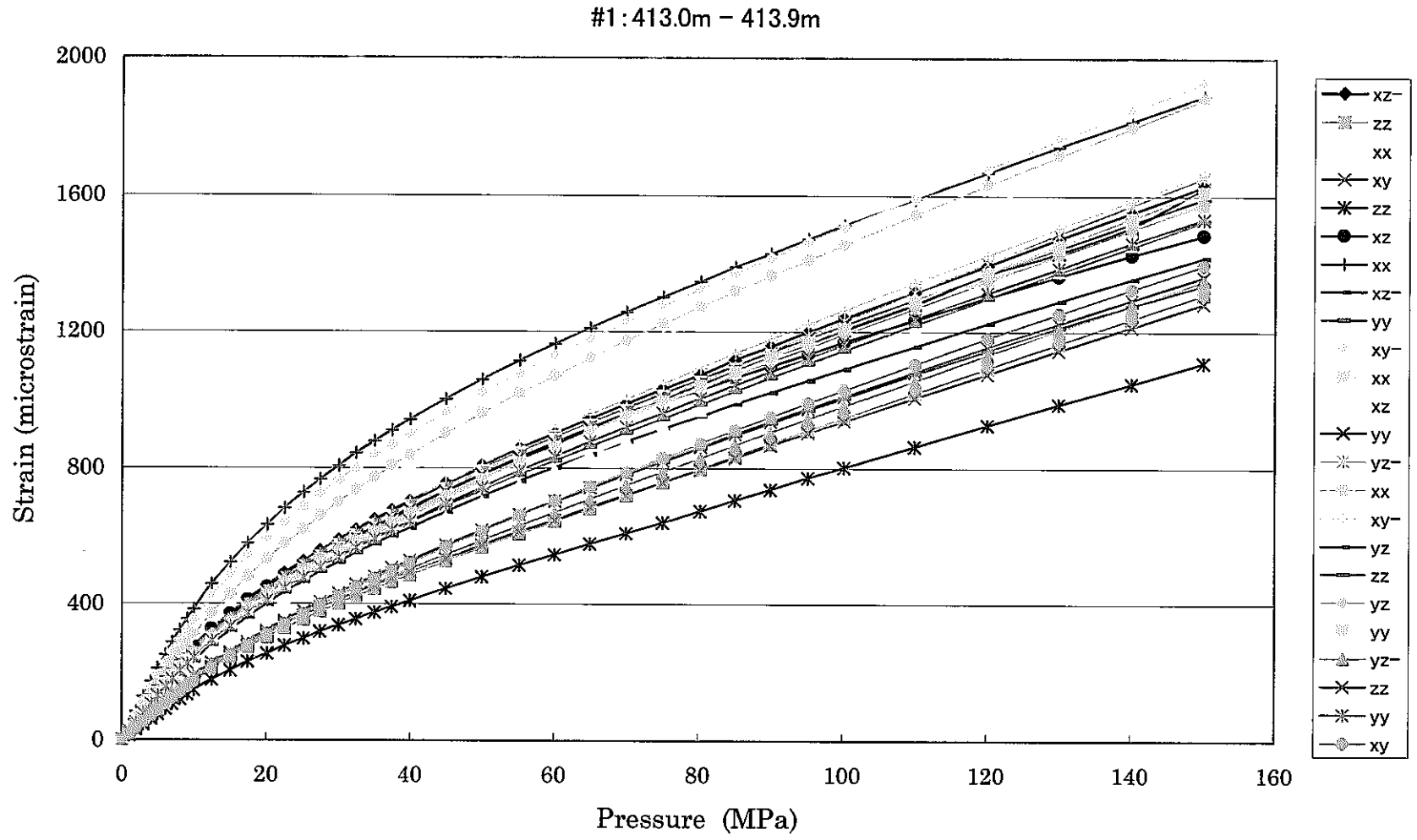
APPENDIX 1

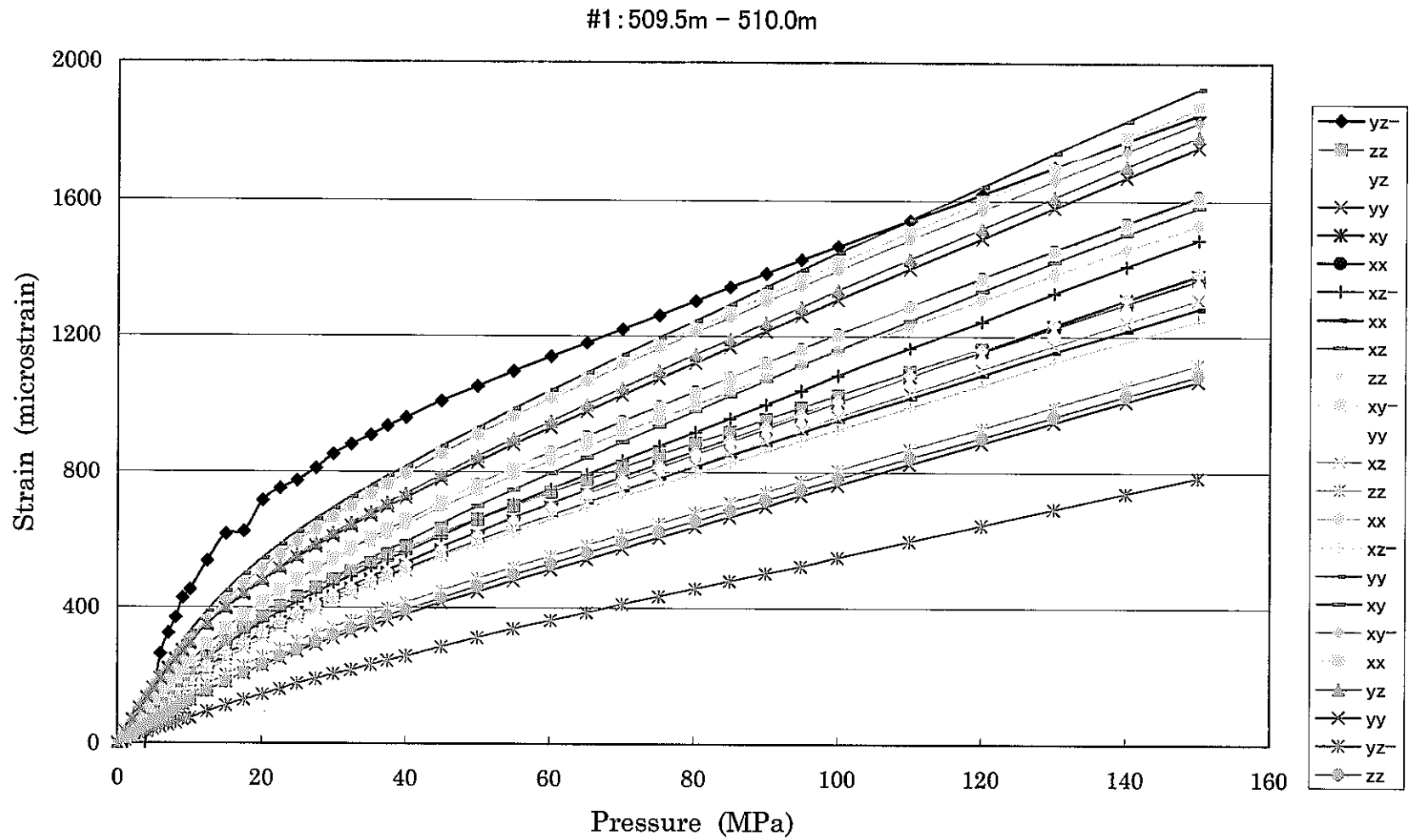
DSCA 試験で得られた各試料の静水圧～ひずみ曲線

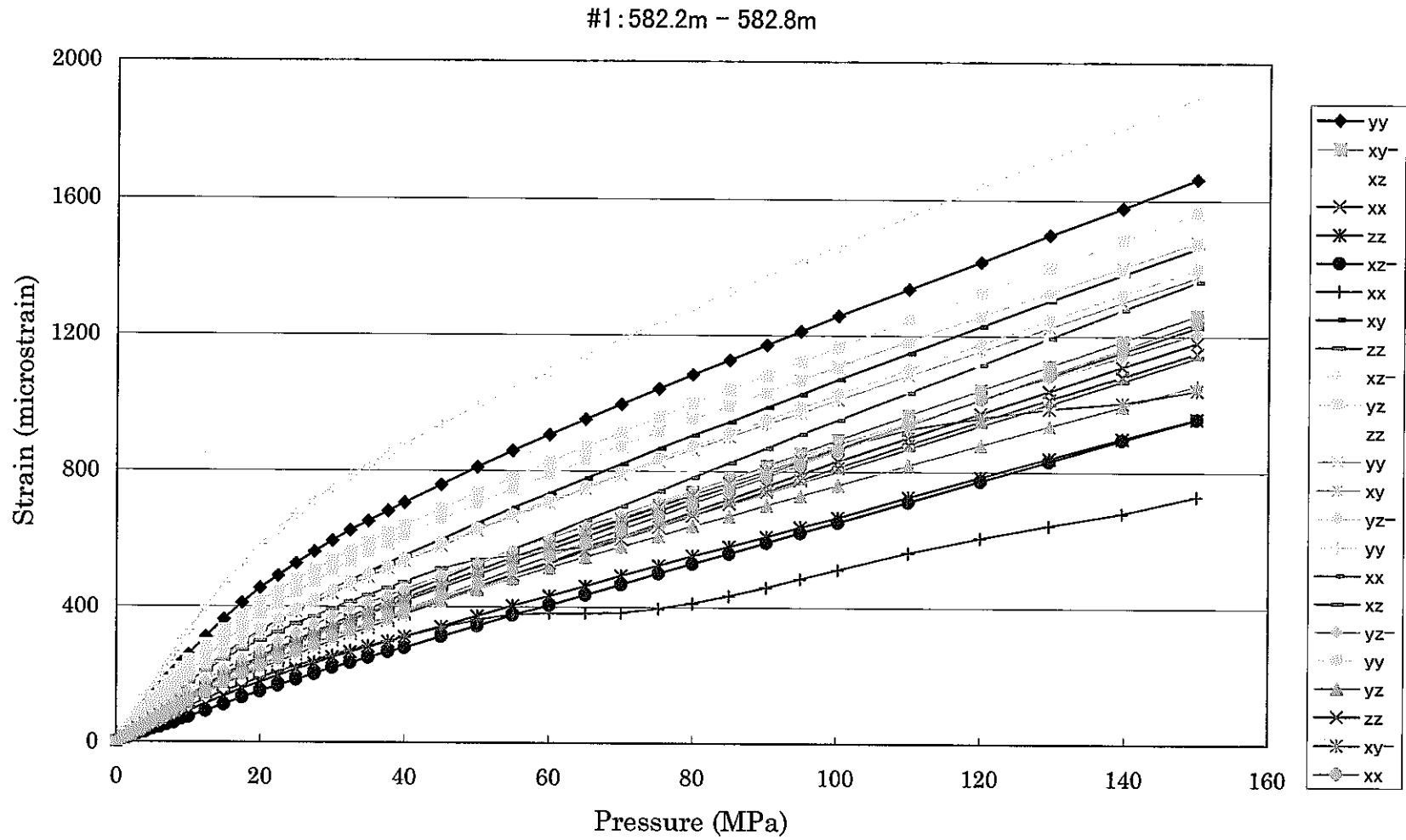
各試料の表面に貼り付けた計 24 枚の
ひずみゲージより得た静水圧とひずみの関係

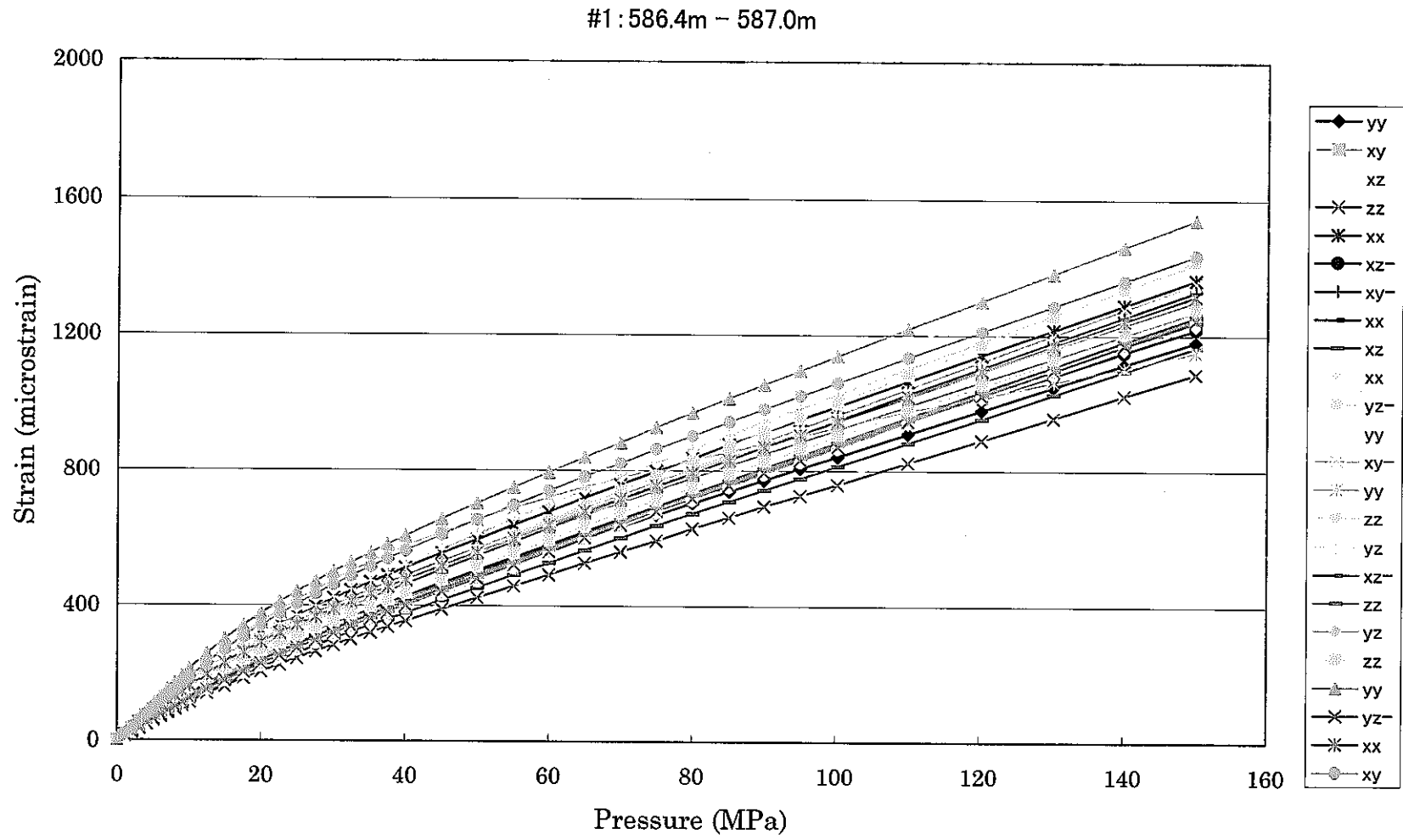


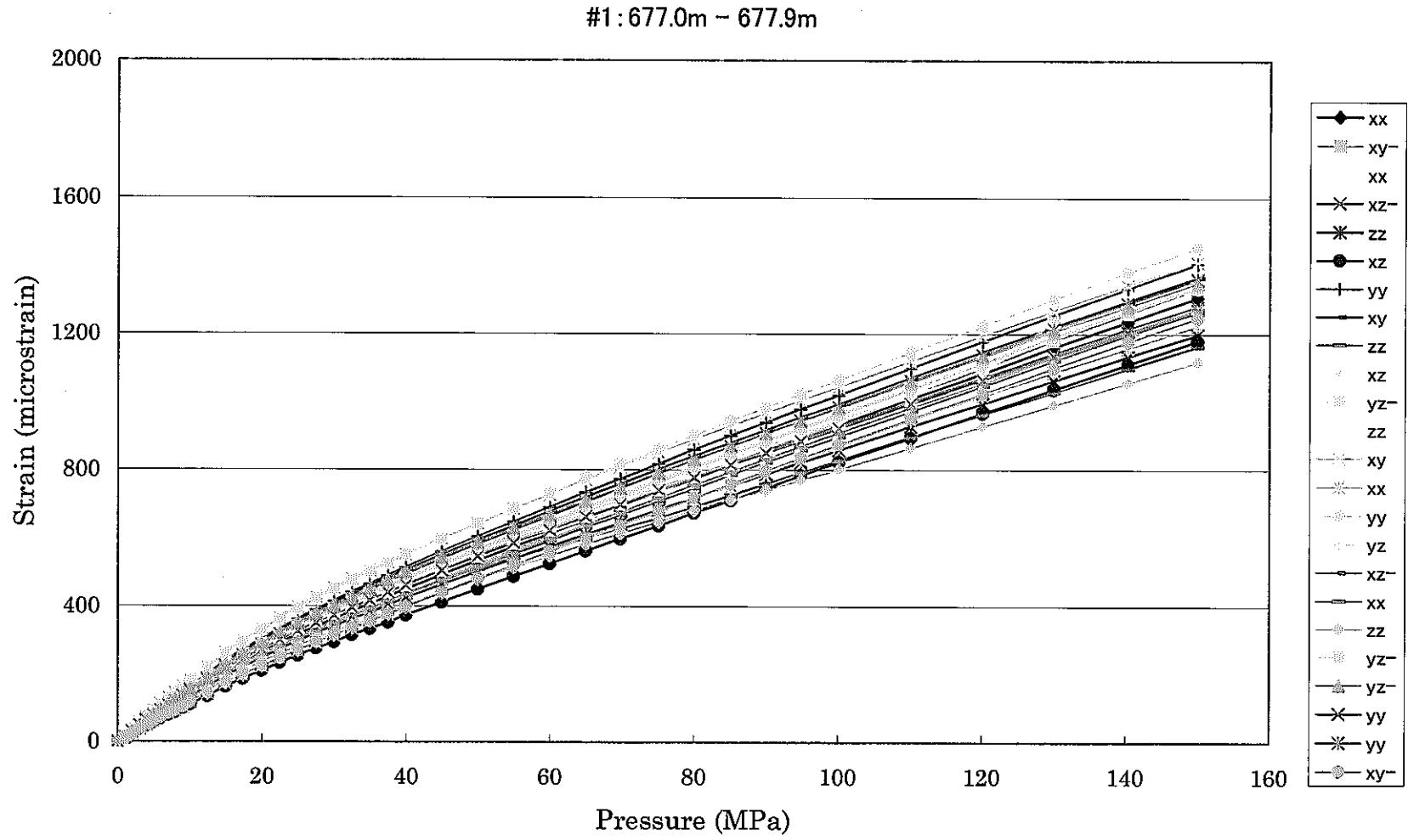


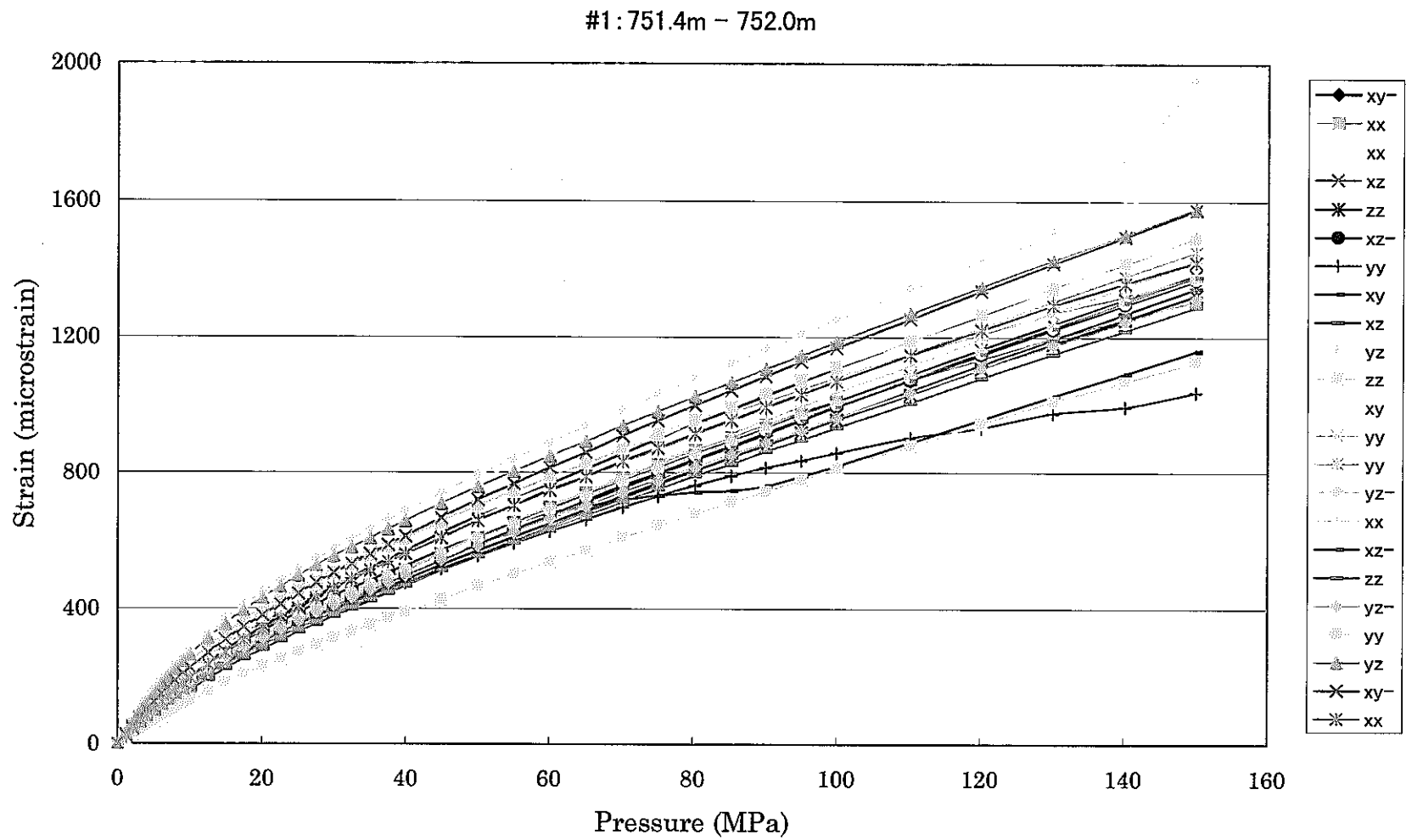


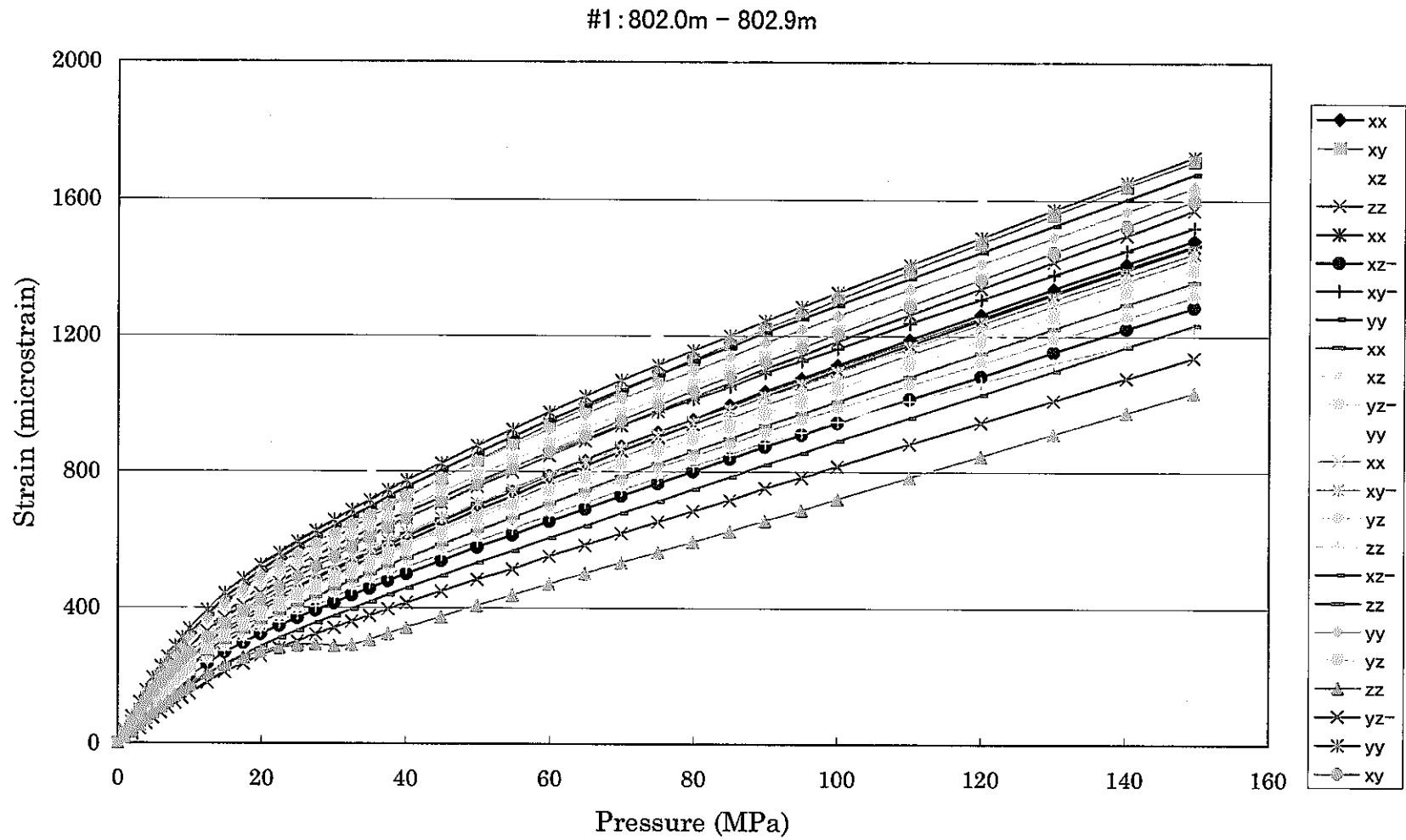


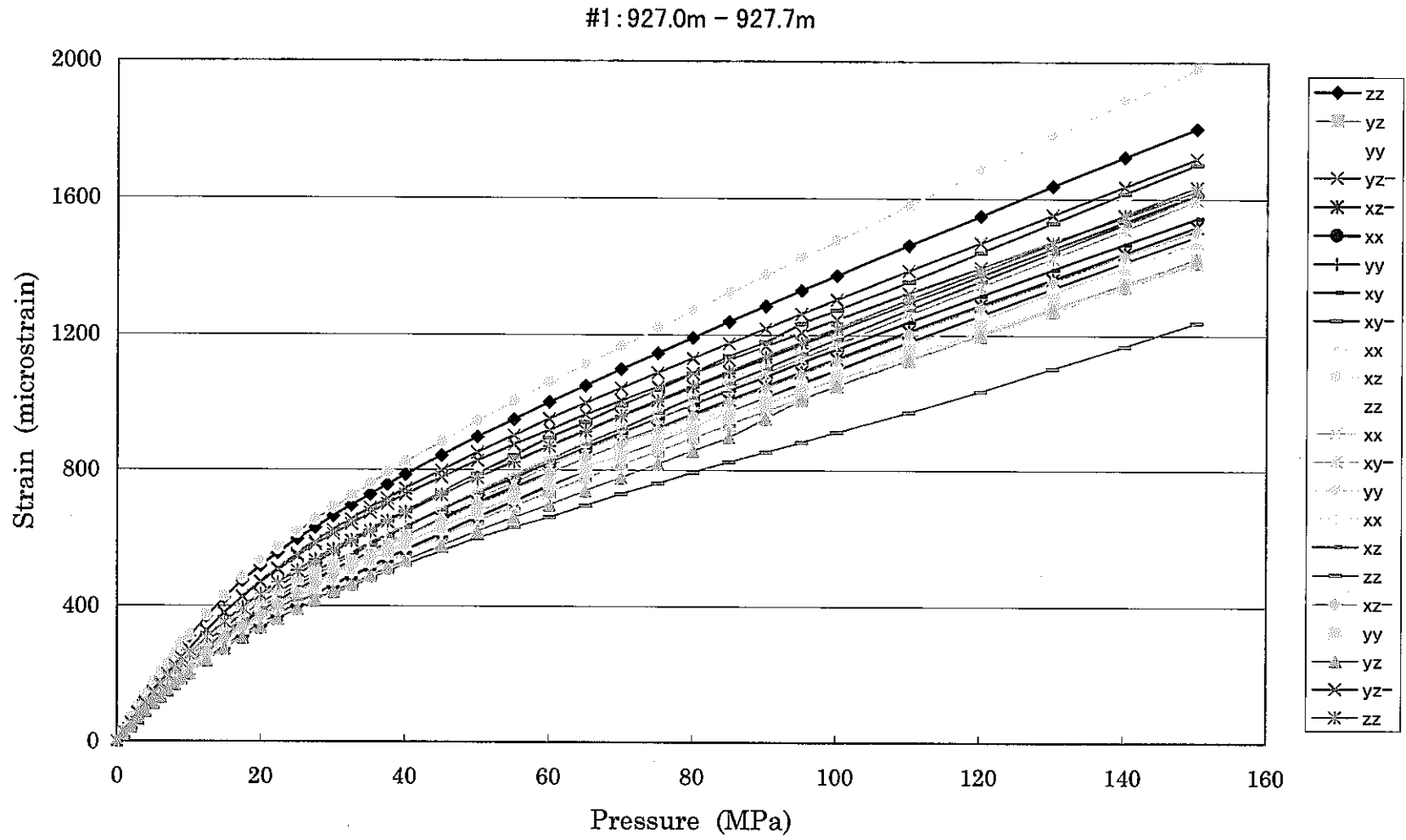




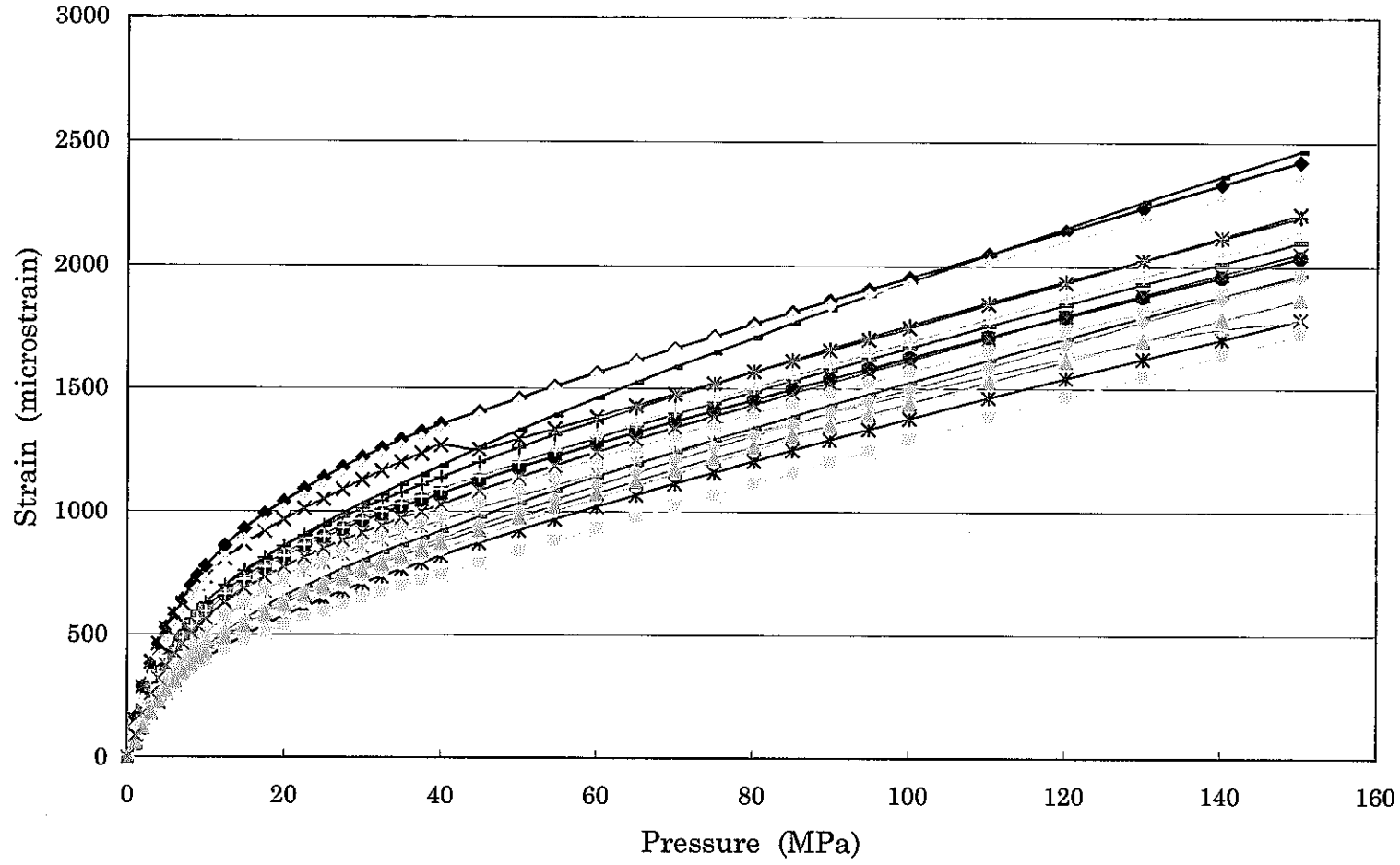


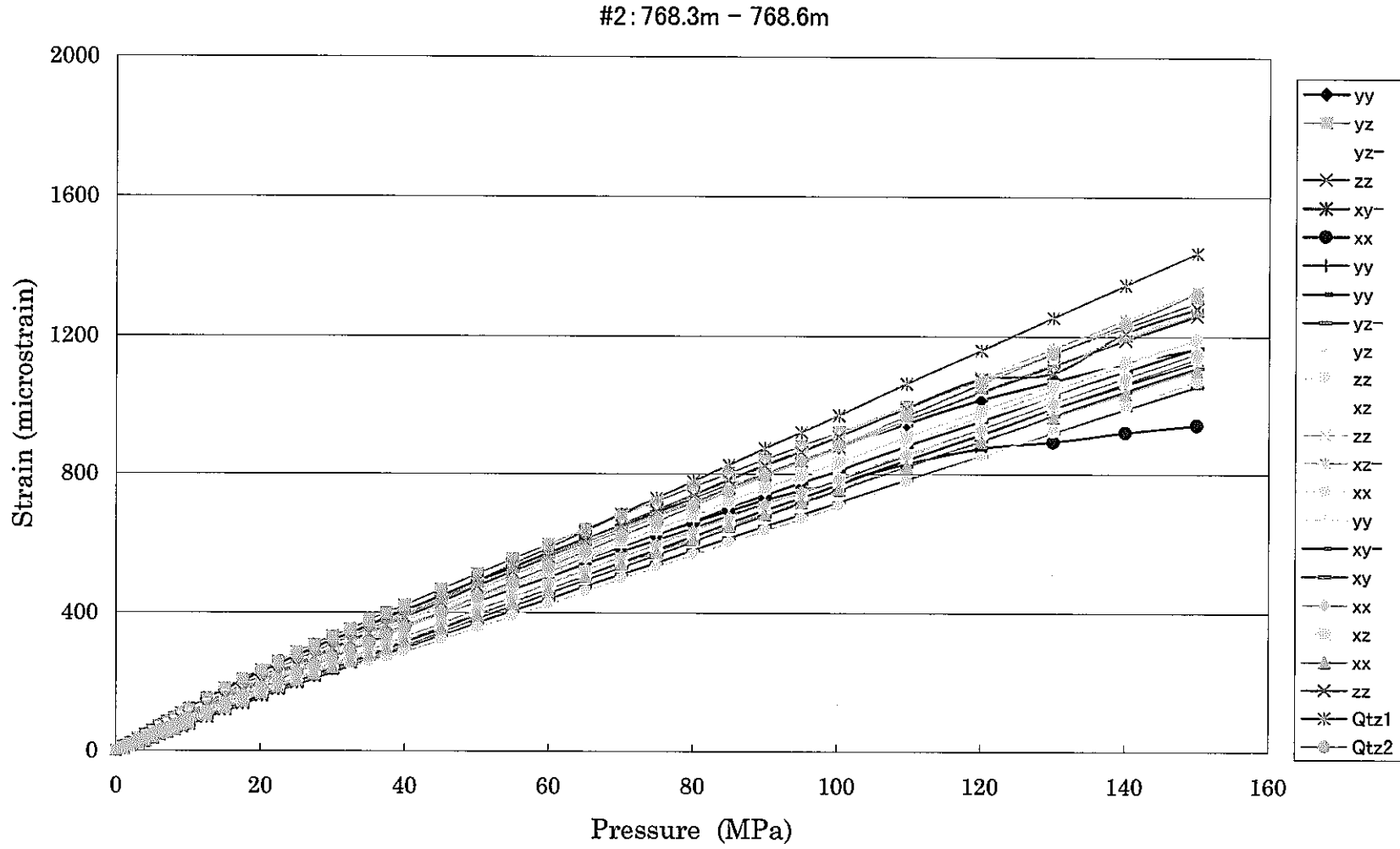




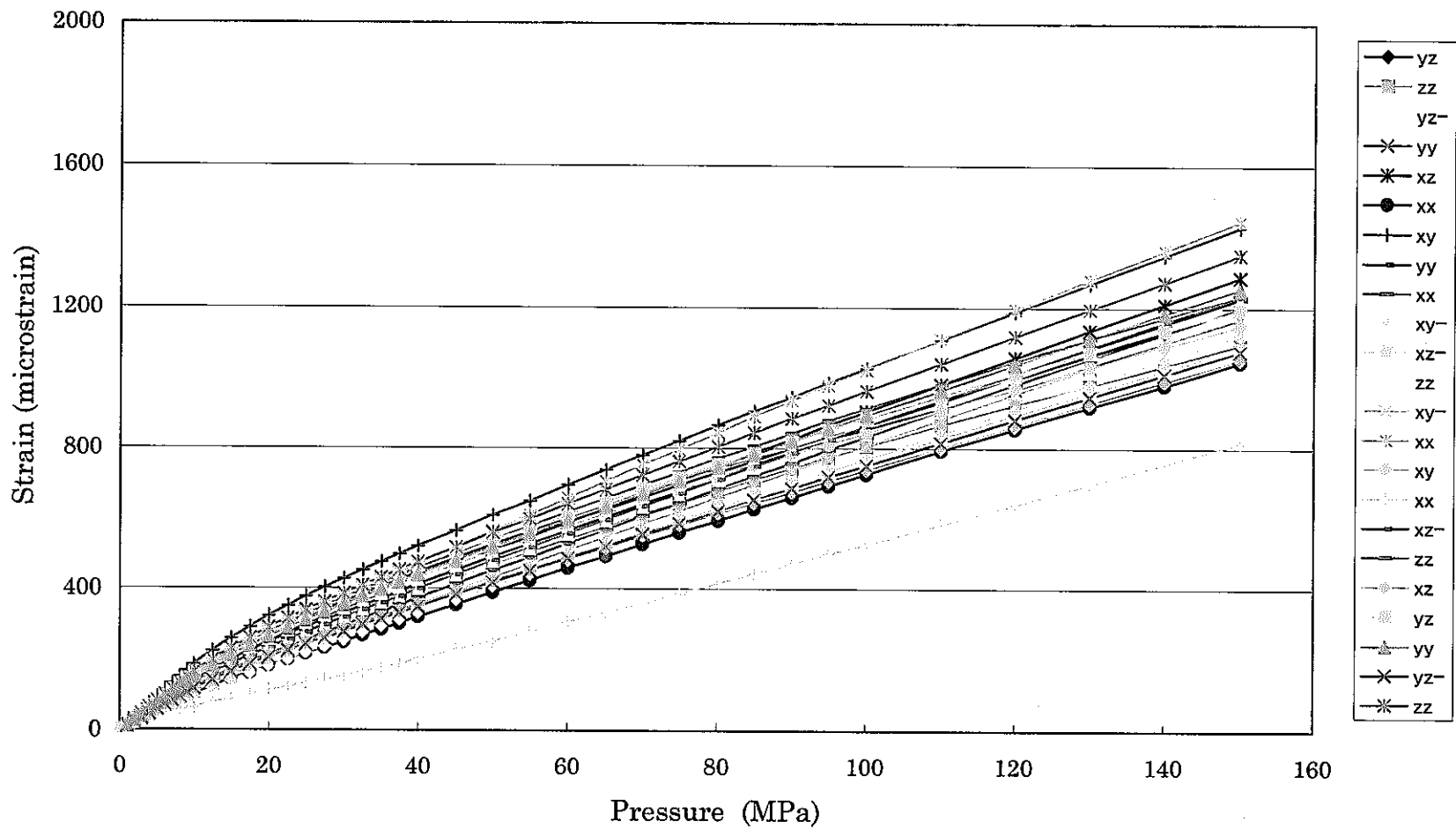


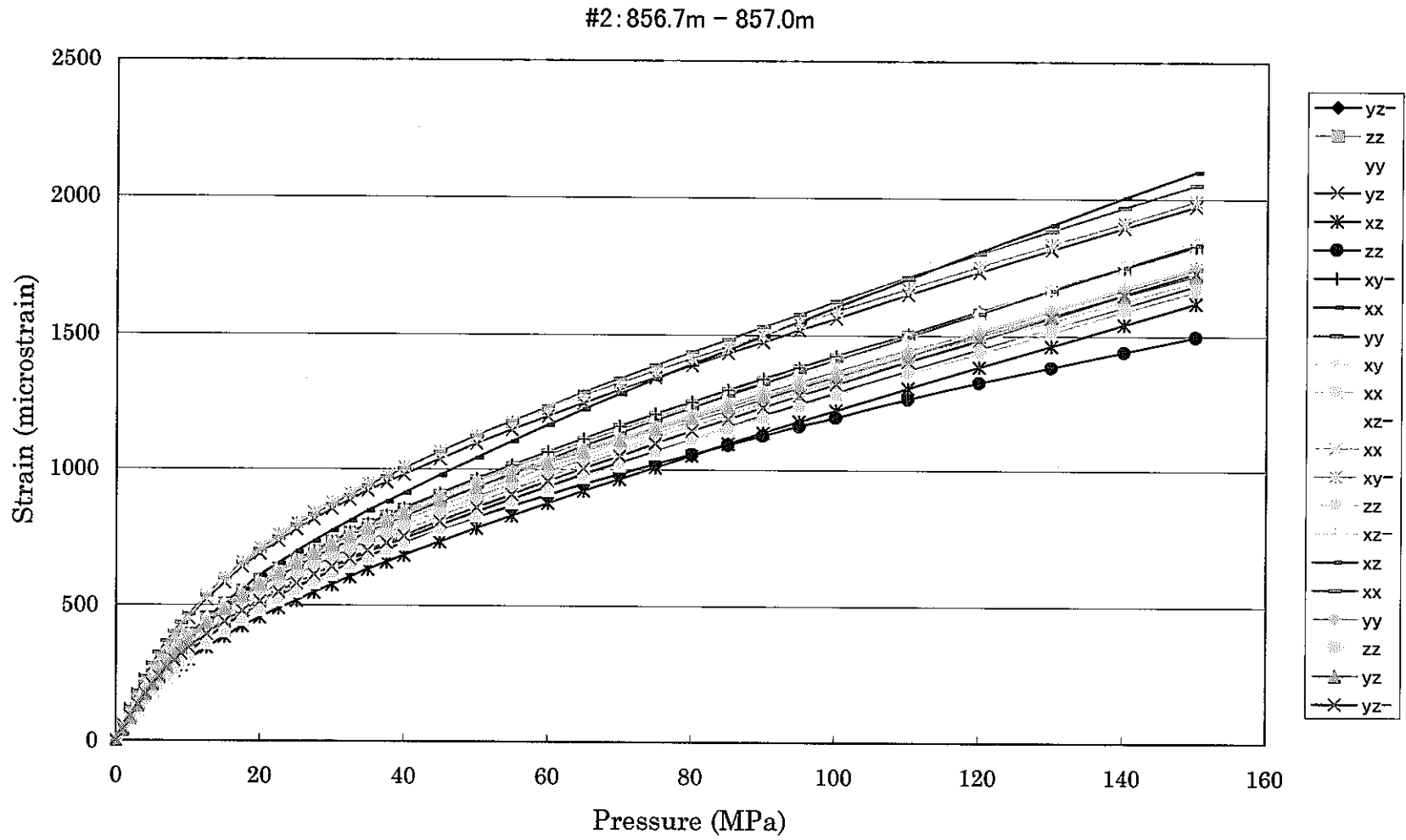
#1: 987.3m - 988.0m



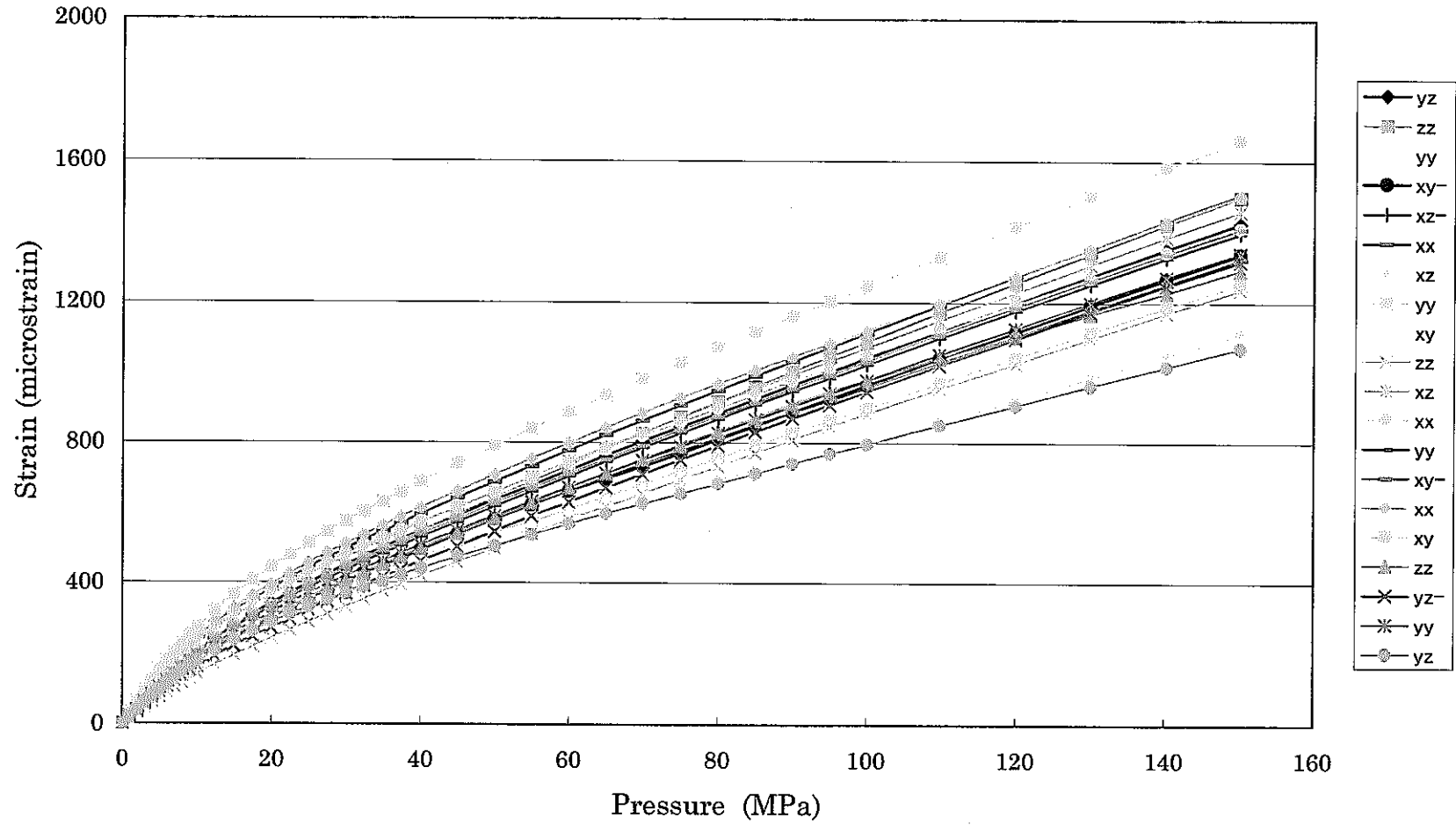


#2: 827.0m - 828.0m





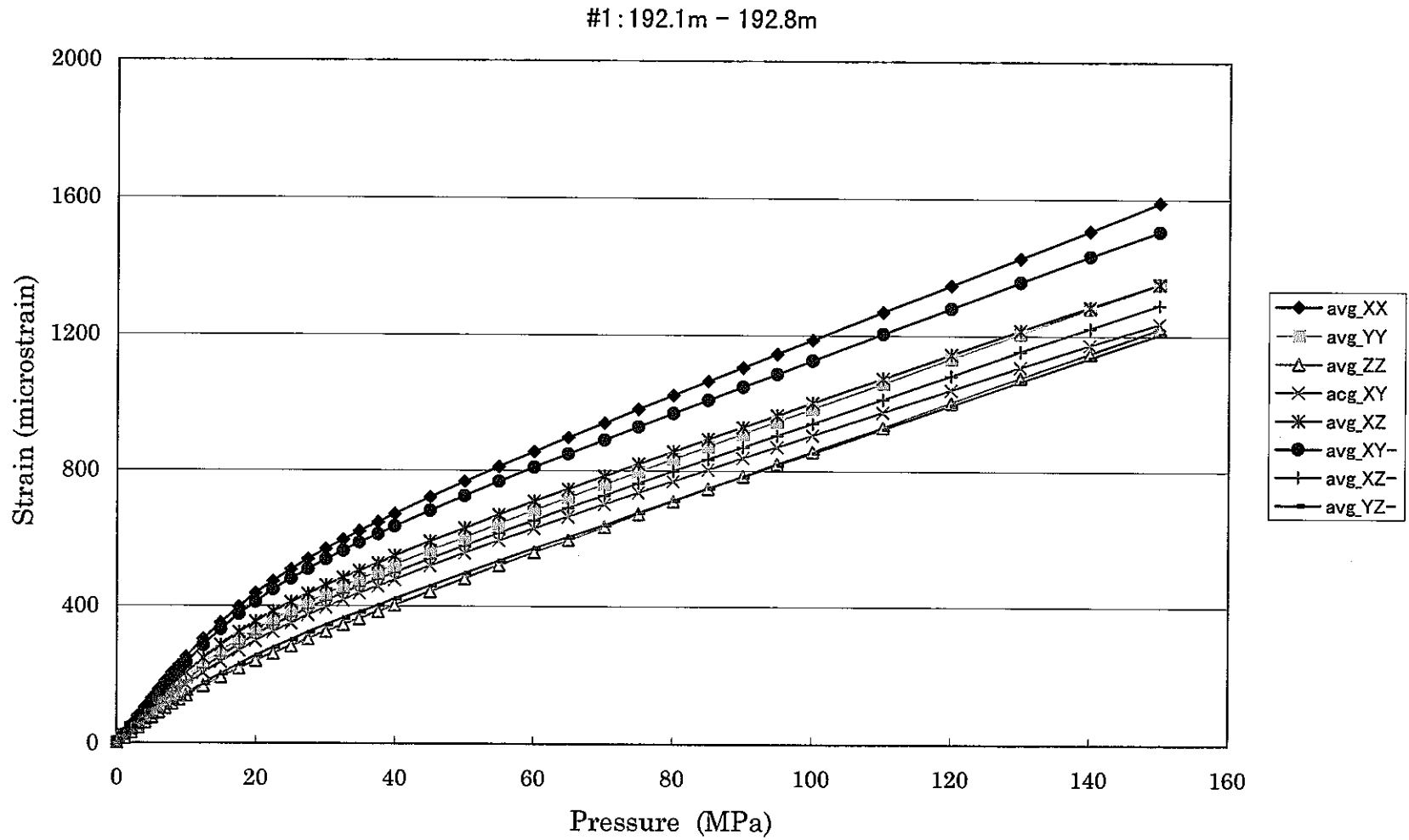
#2: 967.1m - 967.3m

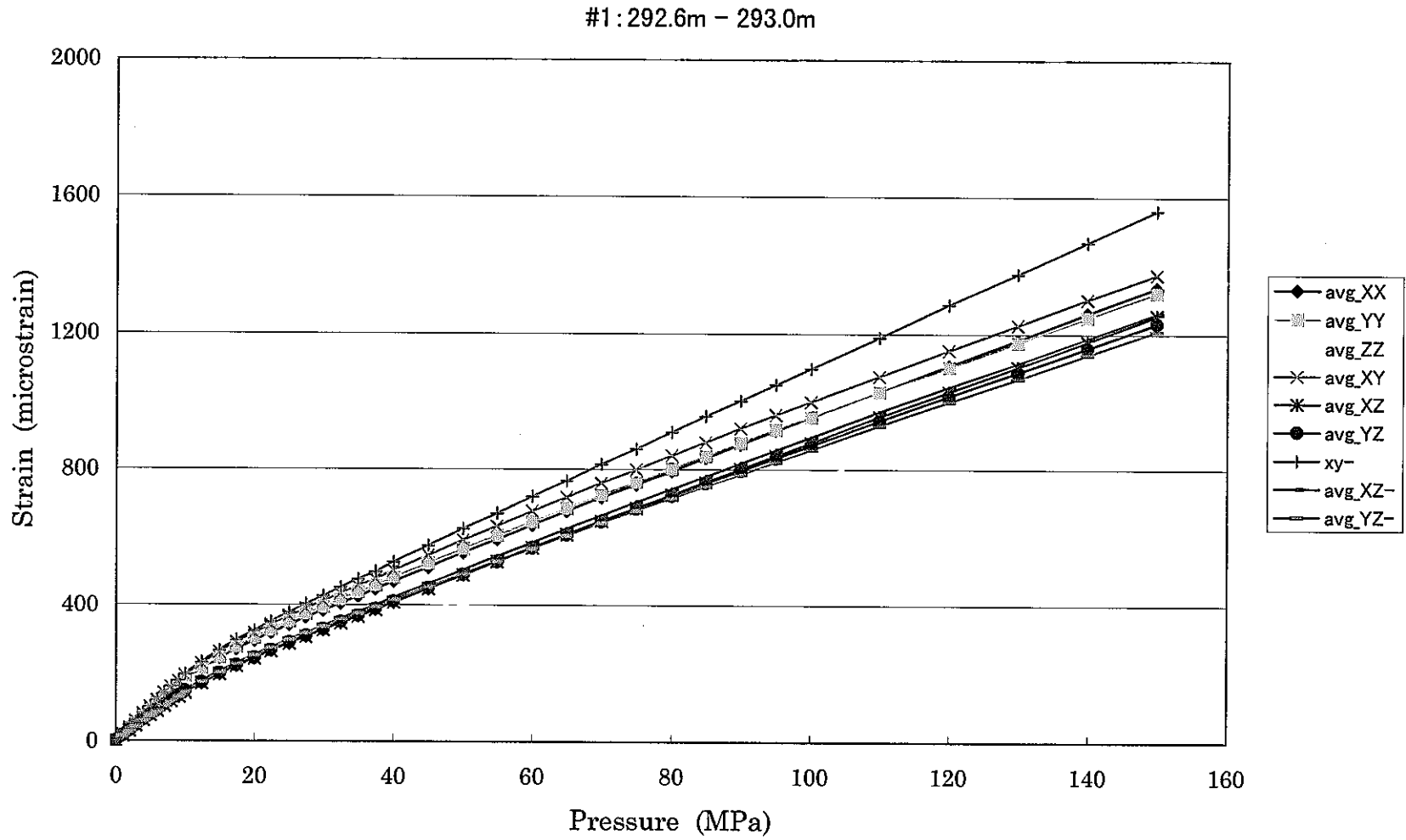


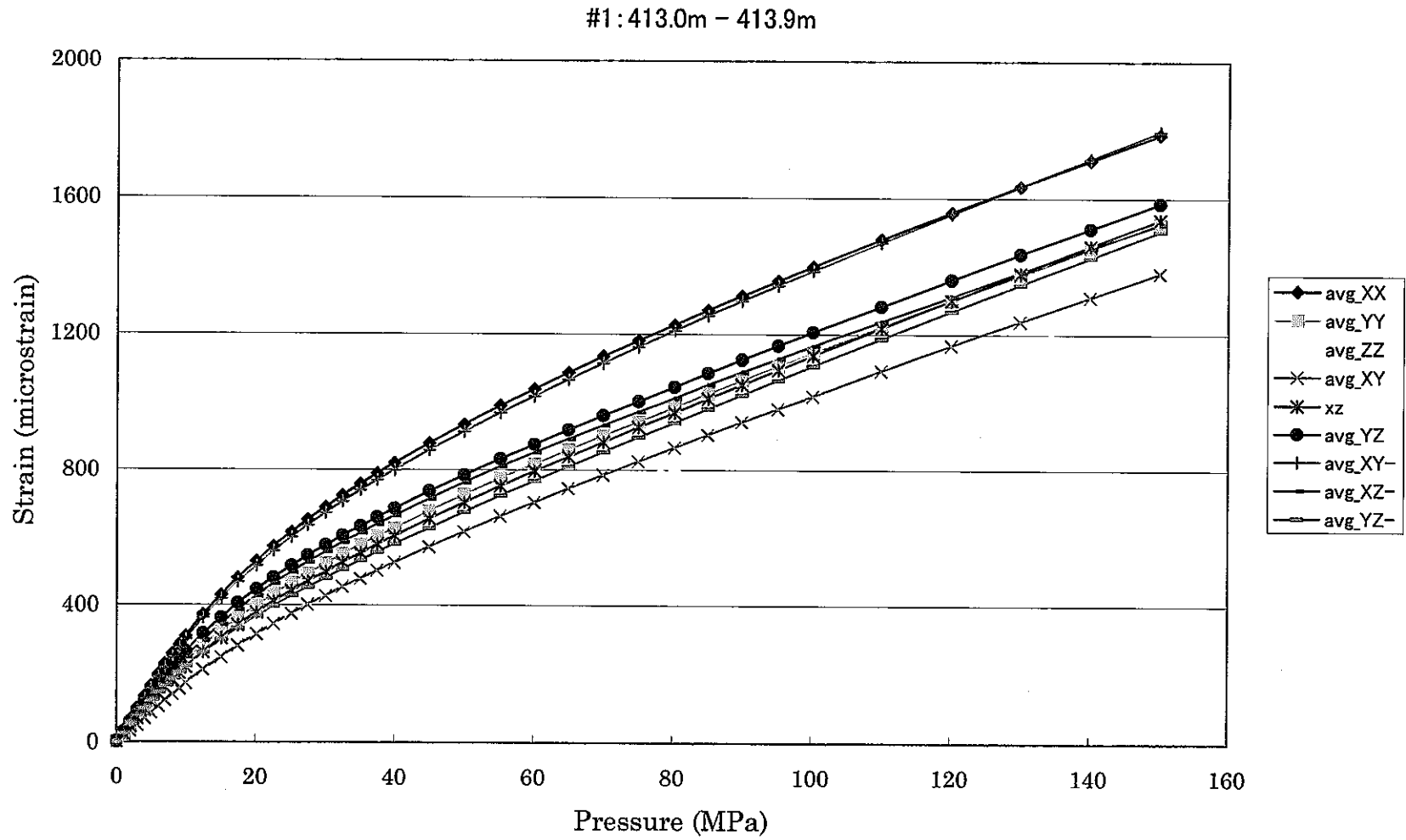
APPENDIX 2

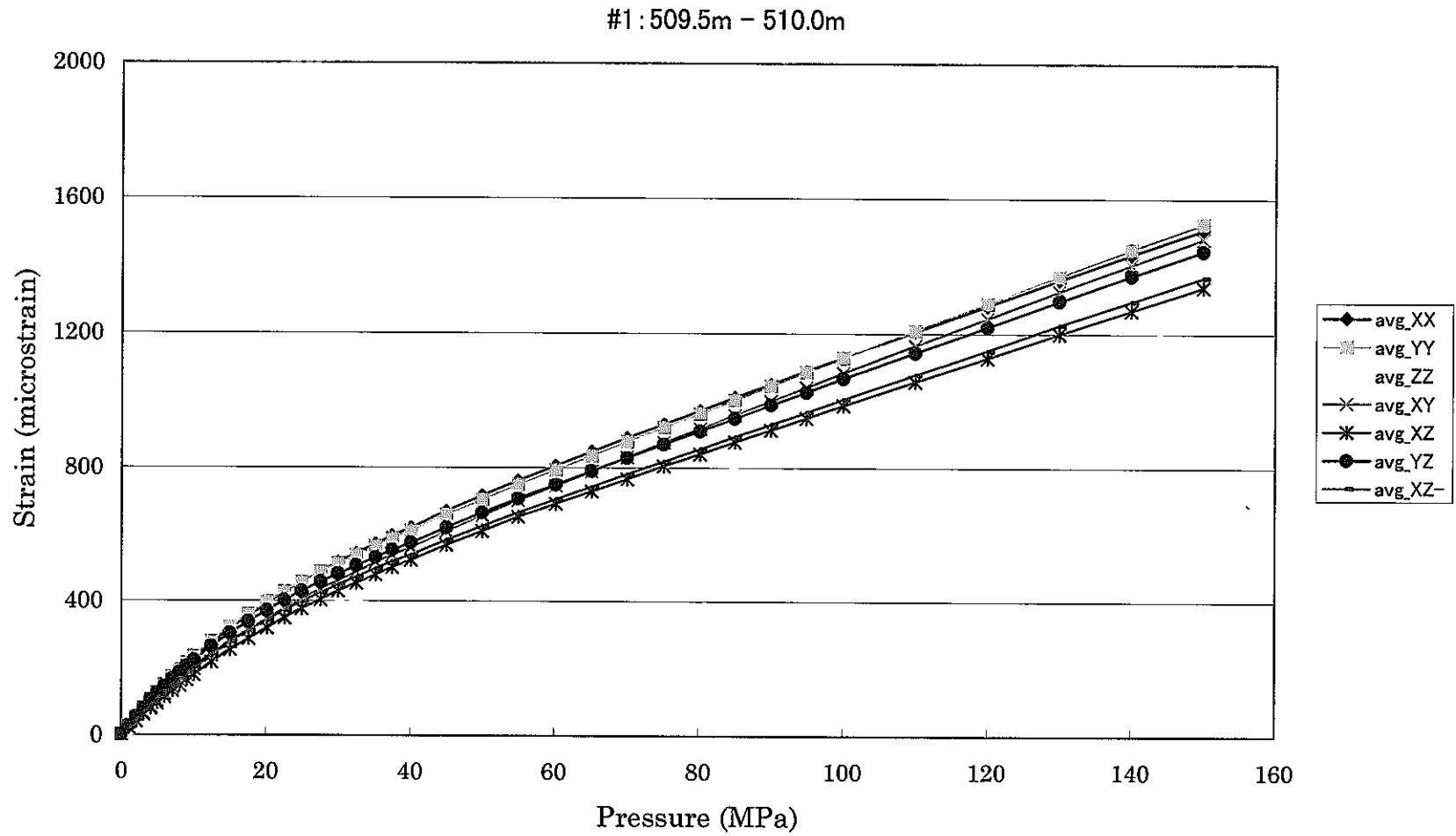
ひずみ解析に用いた各試料の静水圧～ひずみ曲線

静水圧の負荷過程で断線や不安定な値が認められた
ゲージのデータを除外して求めたひずみの平均値と静水圧の関係

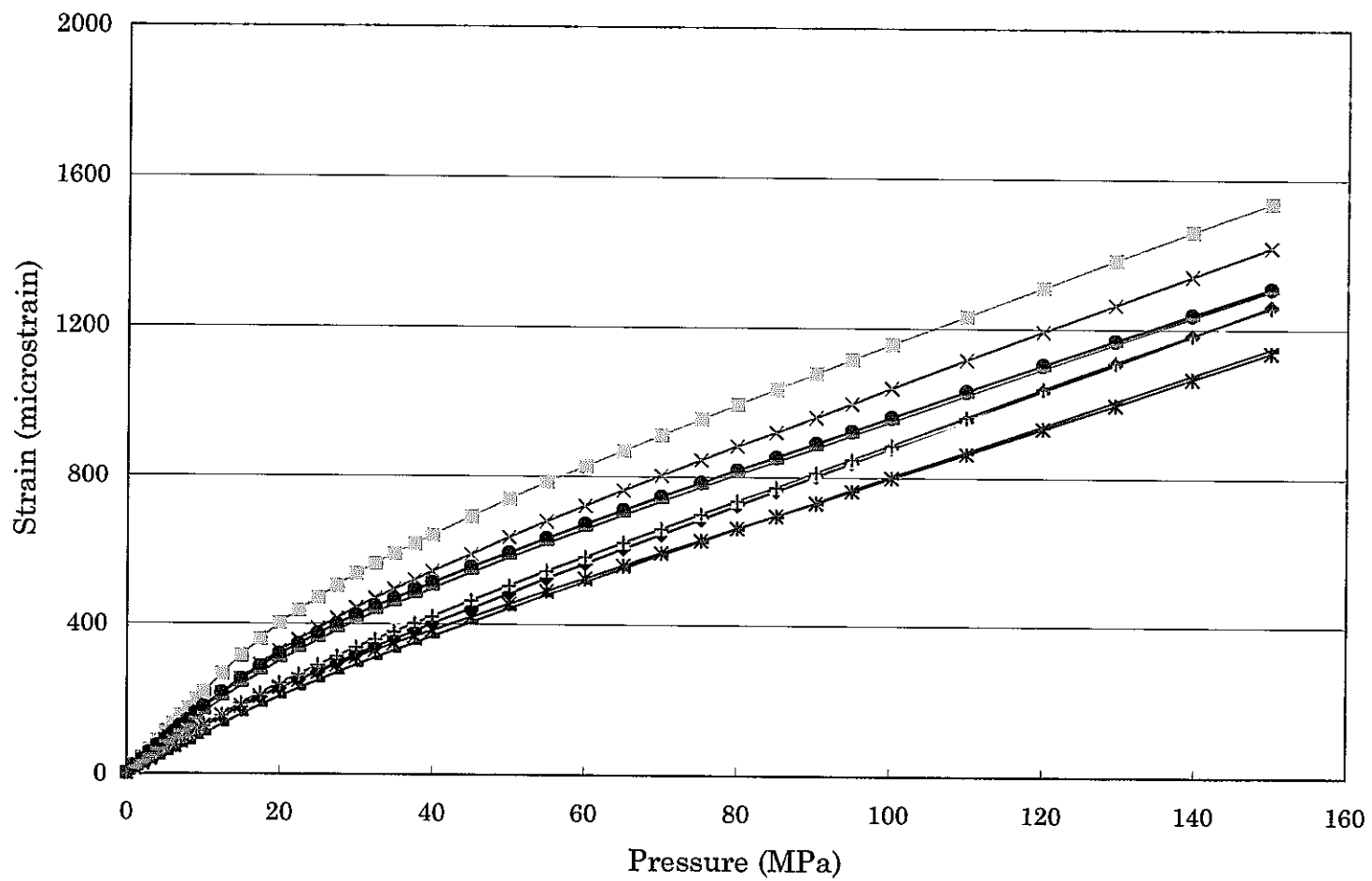




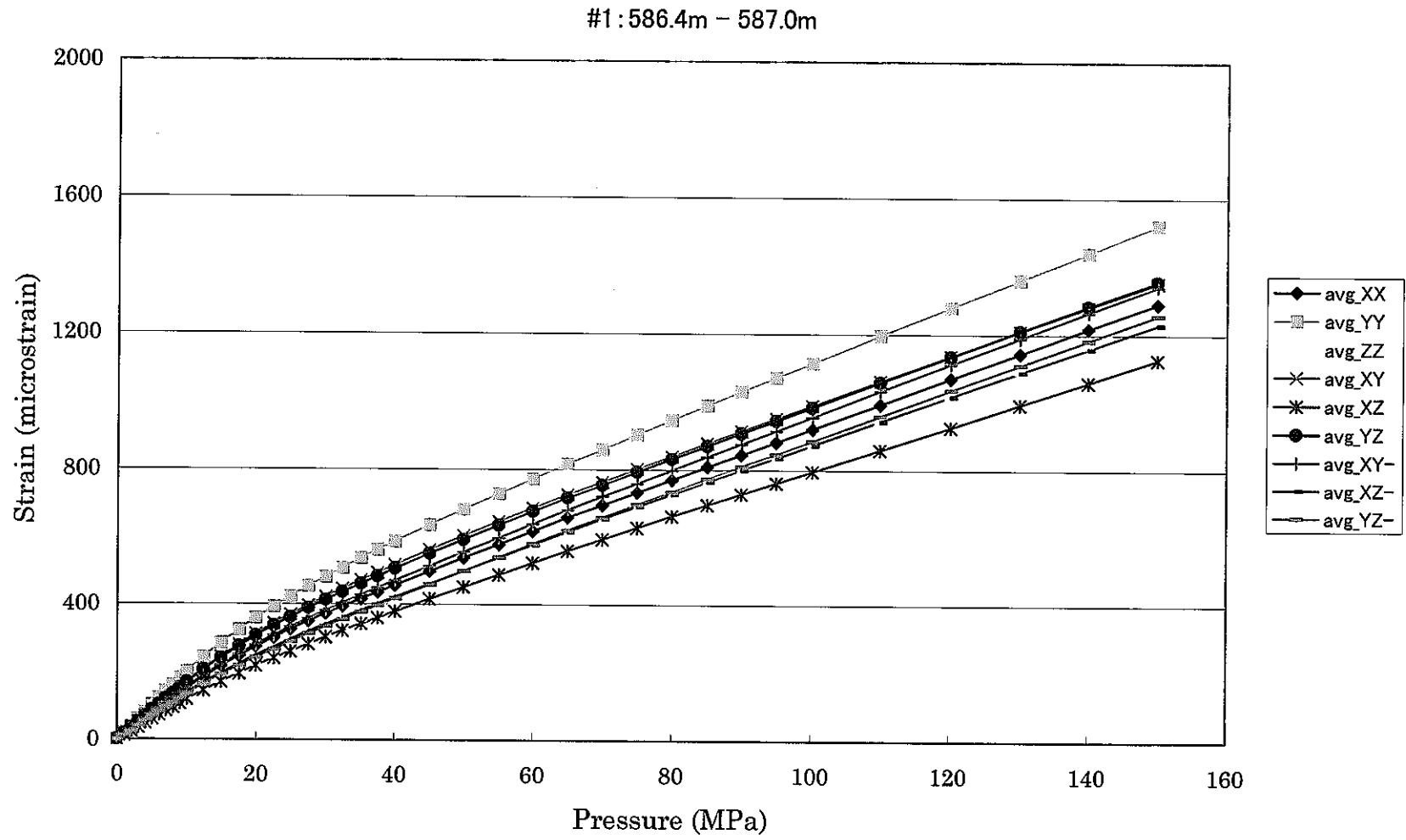


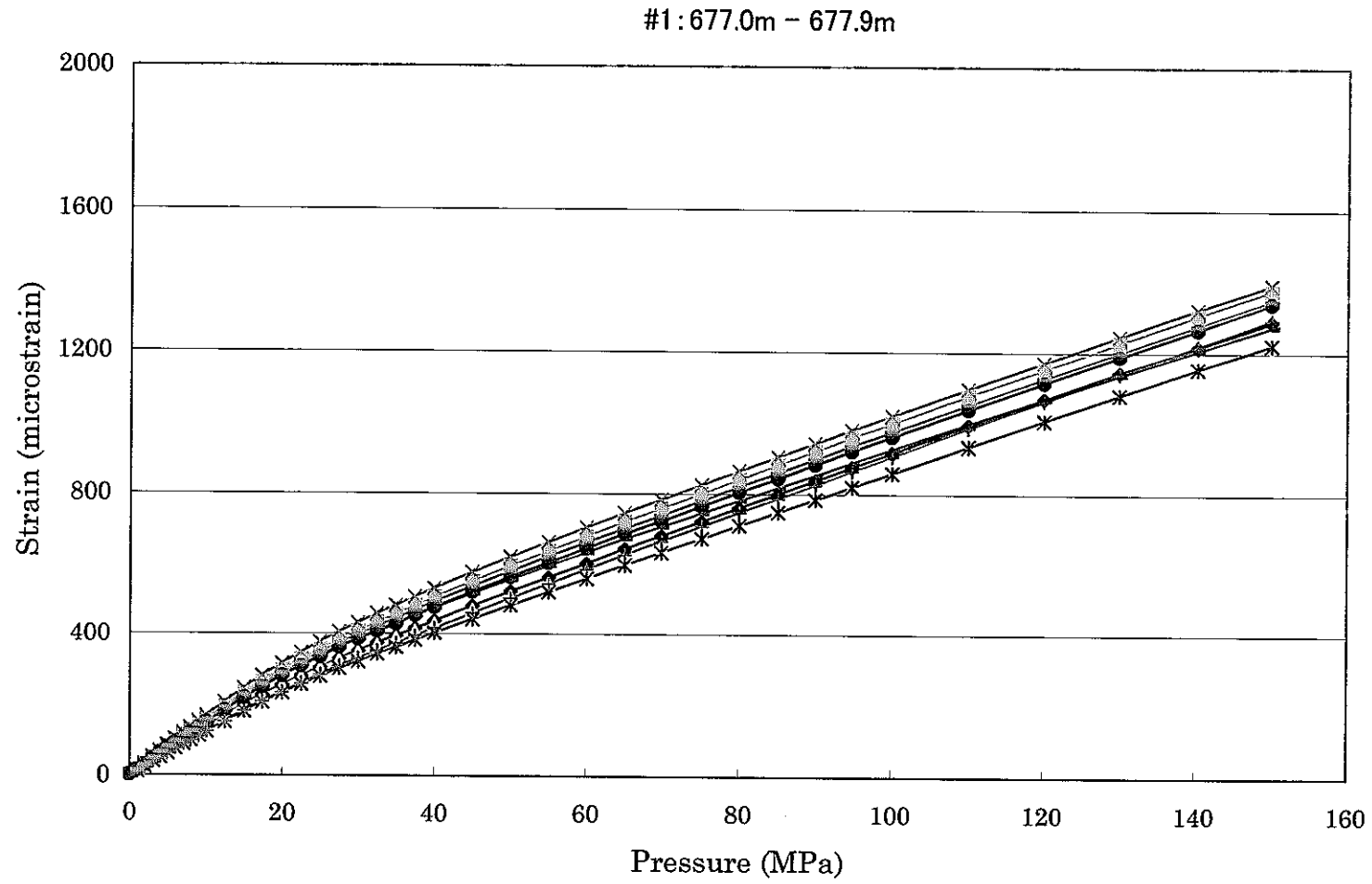


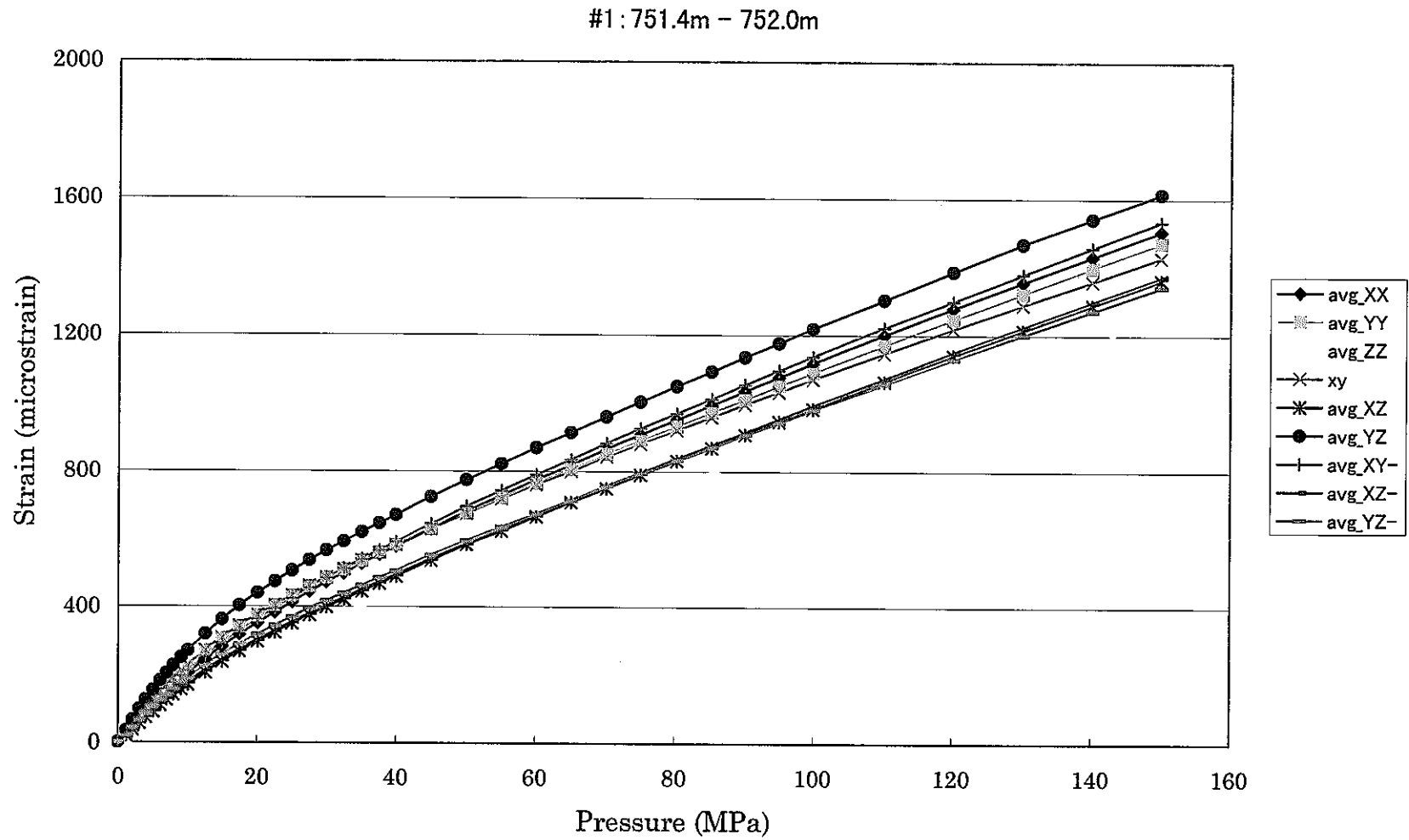
#1: 582.2m - 582.8m

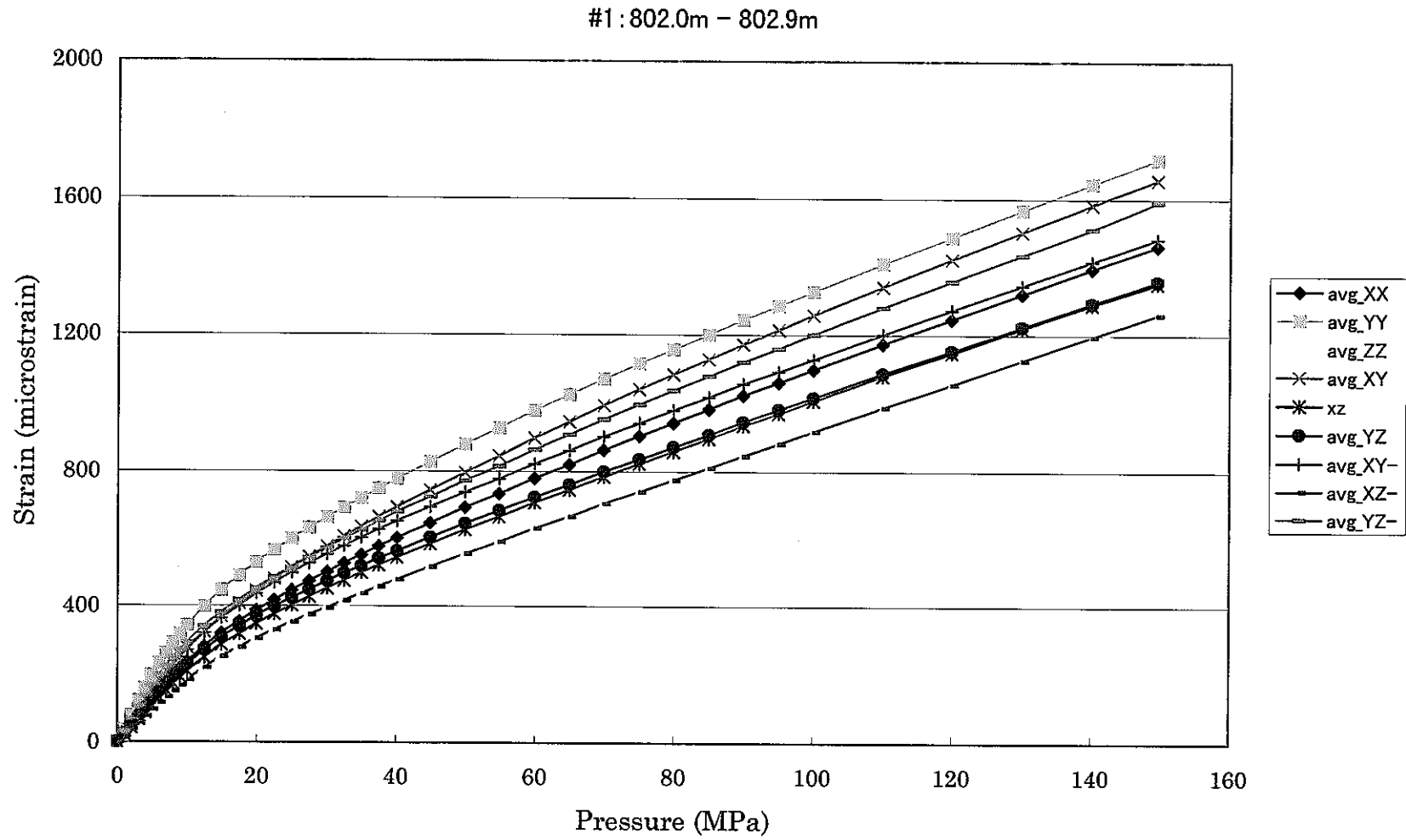


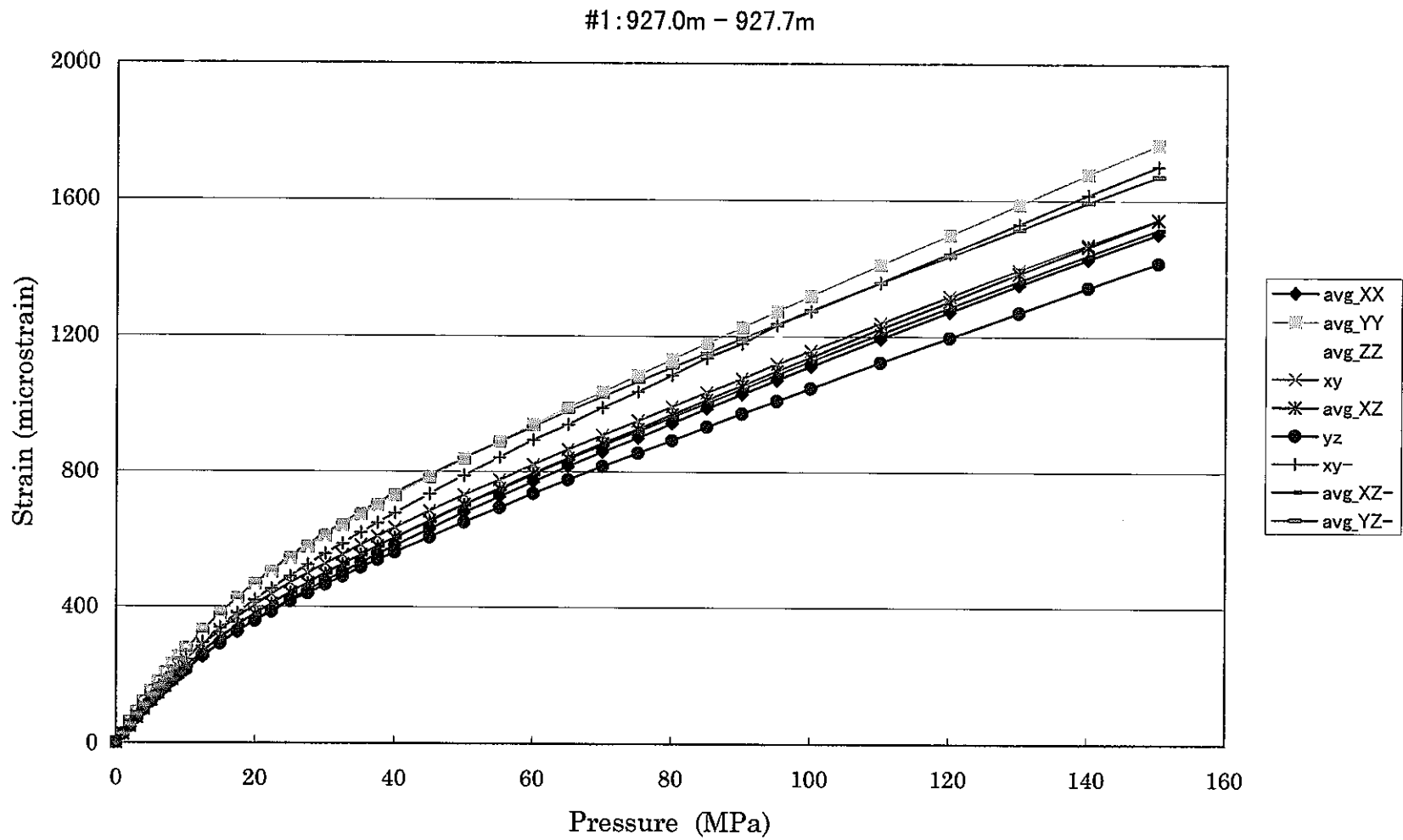
A2-5

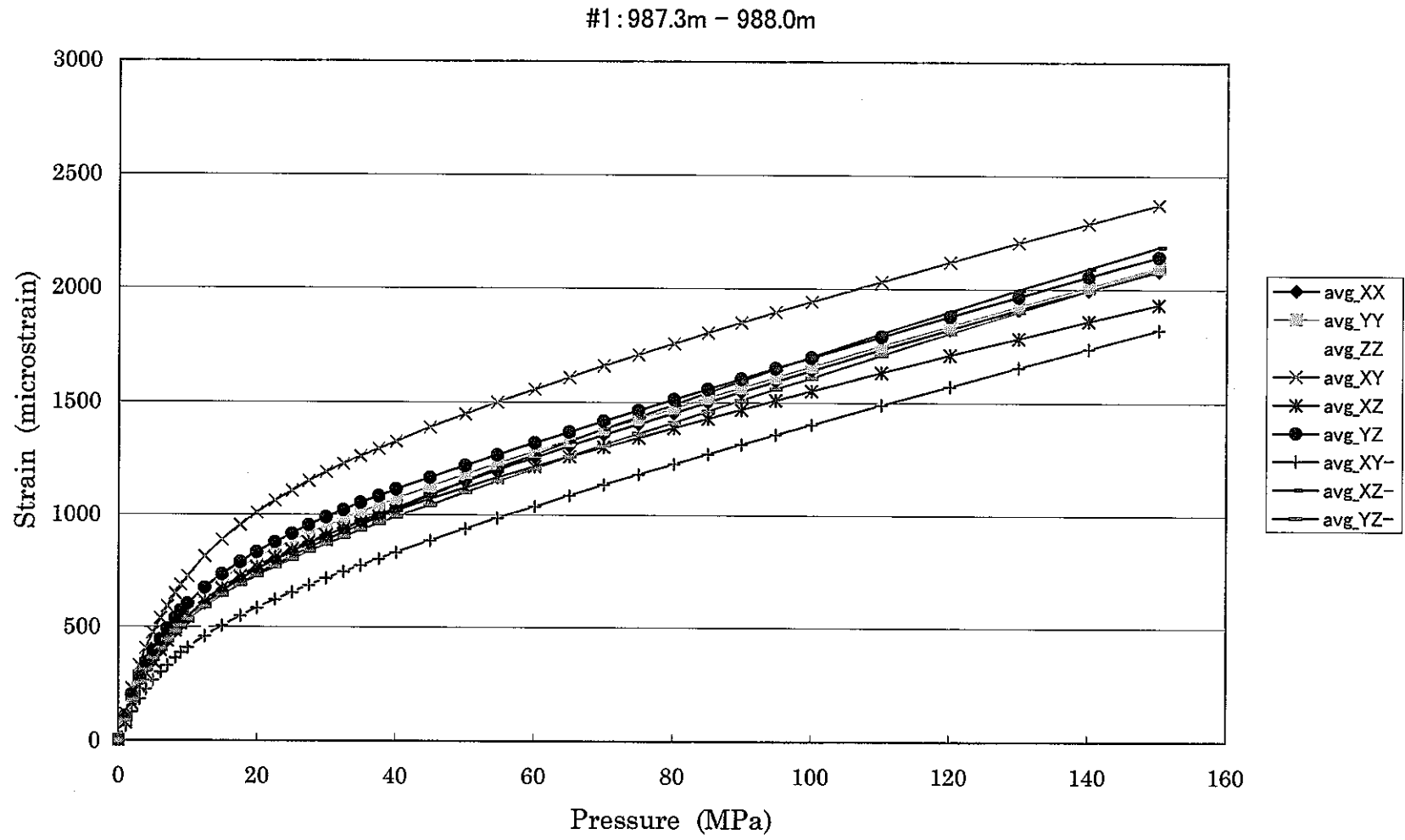


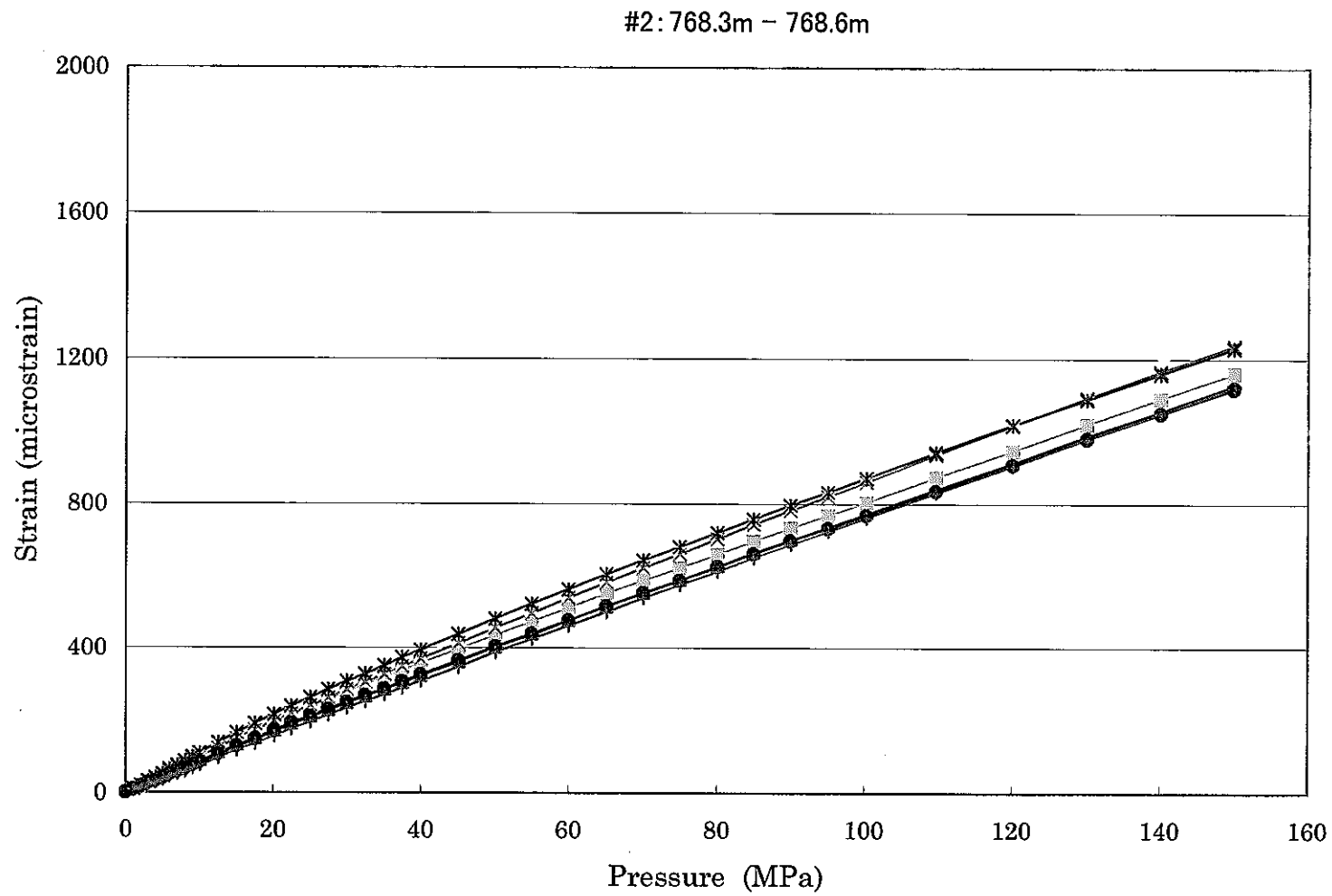


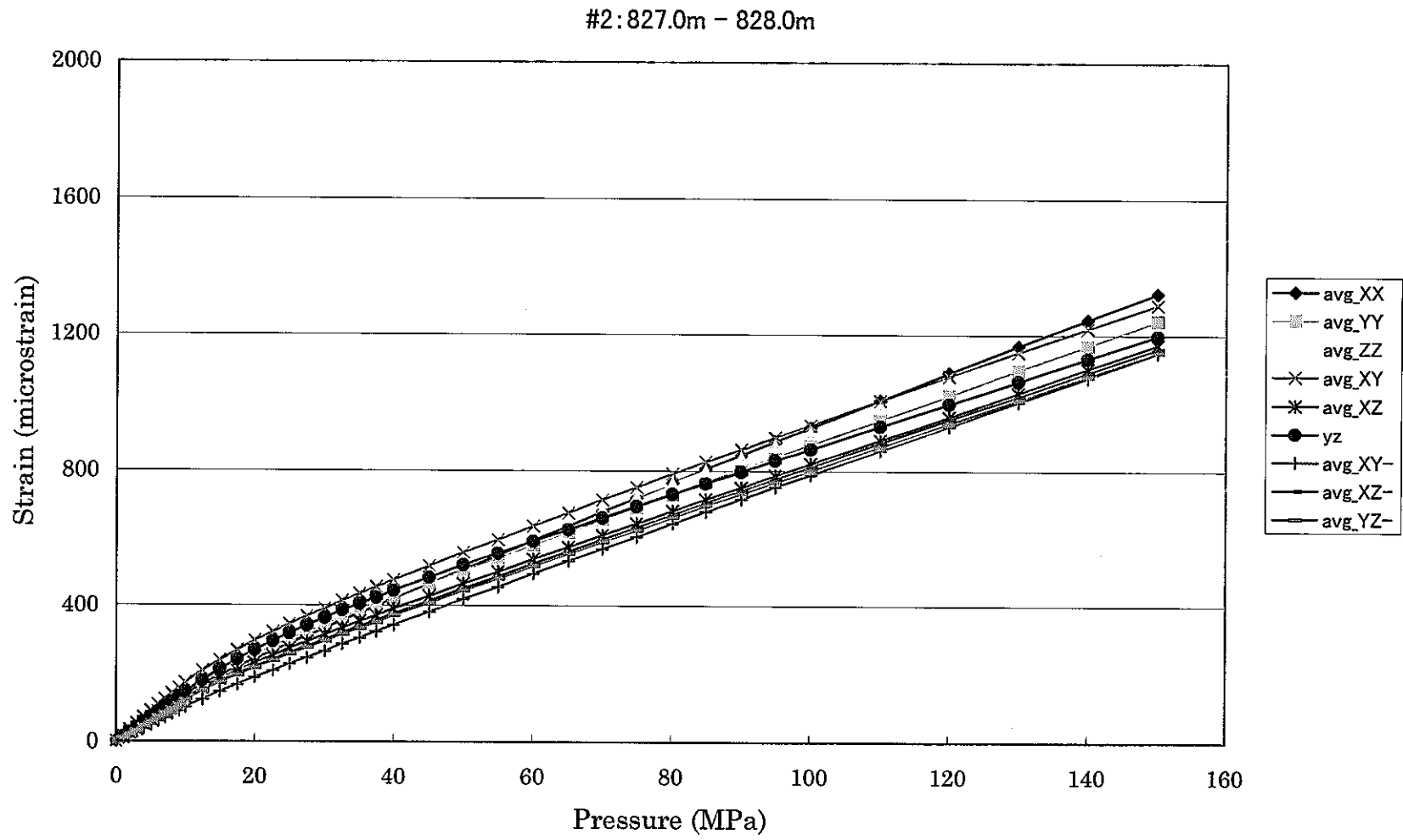


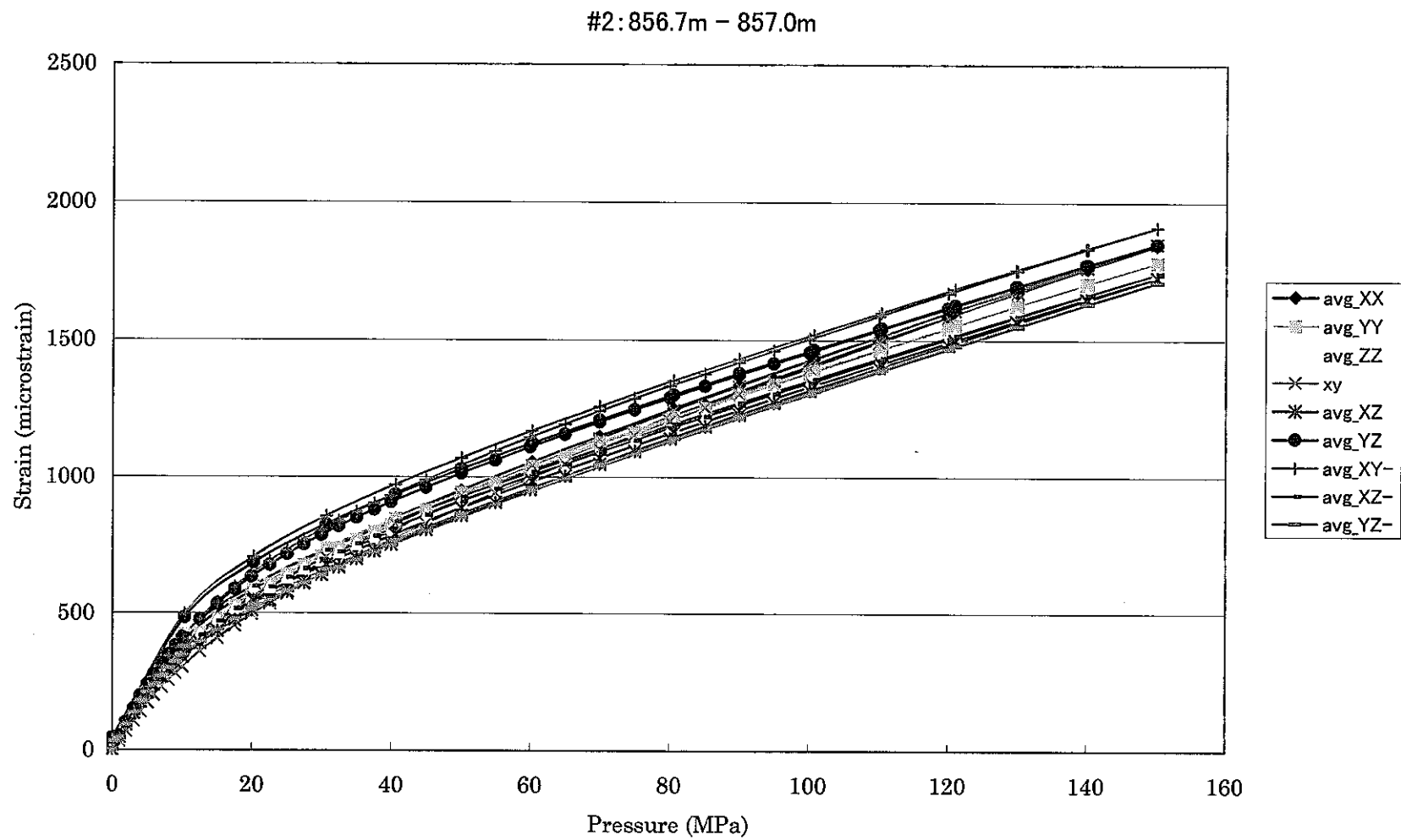


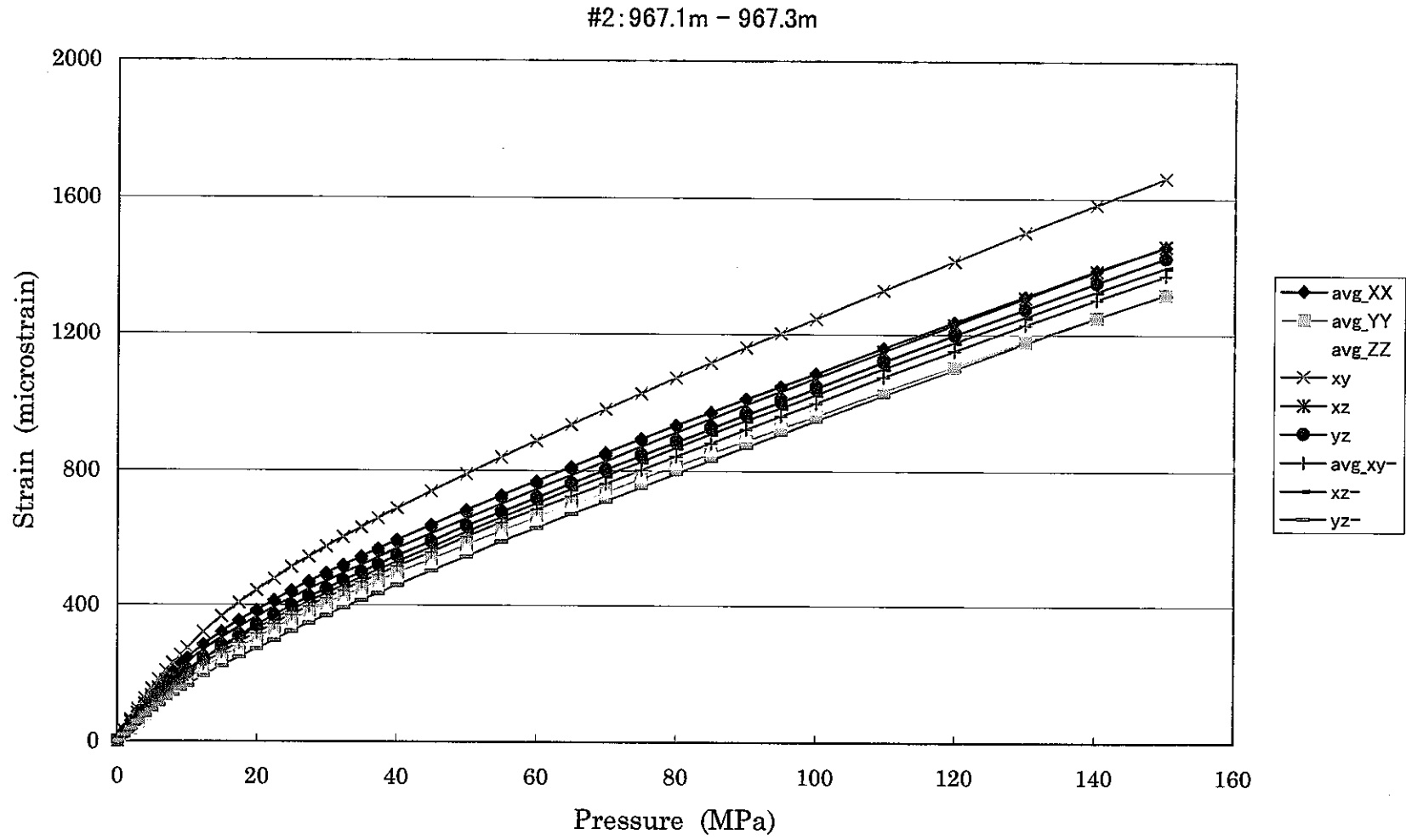












APPENDIX 3

写真集

