

JAERI-M
9109

サポートポストの圧縮破壊試験

1980年10月

菊地 賢司・大熊 嗣男*・佐野川 好母

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

サポートポストの圧縮破壊試験

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

菊地 賢司・大熊 嗣男・佐野川好母^{*}

(1980年9月2日受理)

多目的高温ガス実験炉の炉心を構成する燃料体・可動反射体は、1領域当たり3本の黒鉛よりなるサポートポストによって支持される。また、サポートポストにより形成される高温プレナムは、各領域から流出してくる高温Heガスを混合させる機能も有している。

これらのポストは、原子炉の寿命中には取り替えられることもなく、高温雰囲気中で使われるため、特にその健全性が重要な問題となる。本報告は、サポートポストの軸長/主断面二次半径、傾き角、球面座半径が、圧縮破壊強度に及ぼす影響を調べたものである。供試材は等方性黒鉛である。

* 外来研究員，石川島播磨重工（株）

Compressive Fracture Test of Support Post

Kenji KIKUCHI, Tsuguo OHKUMA* and Konomo SANOKAWA

Division of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 2, 1980)

Fuel blocks and movable reflector blocks consisting of a reactor core of VHTR are supported by three graphite support posts per region. A hot plenum formed by these posts is to mix the coolant gas jets from each region, the average temperature of which is supposed to be about 1000°C. The safety of support post structure is an important problem because they are permanently used in 1000°C and 40atg of coolant gas atmosphere for all reactor lifetime.

The tests described here investigates the effect of (post length)/(radius of gyration of area), inclined angle of post, and radius of spherical edges of post and seat on the compressive fracture strength. Material used is isotropic graphite.

Keywords; VHTR, Support Post, Fracture Test, Post length,
Compressive Fracture Strength, Inclined Post Angle,
Spherical Post Radius, Weibull distribution,
Scanning electron micrograph

* On leave from Ishikawajima Harima Heavy Industry Co., Ltd.

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	1
2.1 供試材及び試験片形状	1
2.2 圧縮試験機	1
3. 実験結果及び考察	2
3.1 ワイブル分布	2
3.2 軸長／主断面二次半径の影響	3
3.3 ポストの傾き角の影響	3
3.4 ポスト・シートの半径が及ぼす影響	4
3.5 破壊後のポスト破面	4
4. 結 論	5
参考文献	5

Contents

1.	Introduction.....	1
2.	Experimental method.....	1
2.1	Test piece and its shape.....	1
2.2	Compressive test devices.....	1
3.	Results and discussions.....	2
3.1	Weibull distribution.....	2
3.2	The effects of (post length)/(radius of gyration of area)	3
3.3	The effects of inclined post angle.....	3
3.4	The effects of spherical post and seat radii...	4
3.5	Fractography.....	4
4.	Conclusions	5
	References.....	5

記 号 表

A	;	ポストの断面積
a	;	ワイブル分布直線の切片
b	;	定 数
b'	;	"
c	;	"
c'	;	"
D	;	ポストの直径
E	;	ヤング率
I	;	断面二次モーメント
i	;	n個の試験片のうち i 番目に弱い試験片の順番
k	;	主断面二次半径 $k = (I/A)^{\frac{1}{2}}$
L	;	ポストの軸長
l	;	軸 長
m	;	ワイブル分布直線の傾き
n	;	試験片の数
P	;	荷 重
R _a	;	中心線平均粗さ
R _{max}	;	表面あらさの最大高さ
r _p	;	ポストの球面座半径
r _s	;	シート "
ε	;	歪
$\dot{\epsilon}$;	歪 速 度
θ	;	ポスト傾き角
σ	;	応 力
$\bar{\sigma}$;	ワイブル分布の平均値
σ _g	;	公称実断面応力

1. 緒 言

多目的高温ガス実験炉において、炉心を構成する燃料体、可動反射体は、1領域当たり3本の黒鉛よりなるサポートポストによって支持される。また、サポートポストにより形成される高温プレナムは、各領域よりジェット流となって流出してくる高温Heガスを混合させる機能も有している。

サポートポストとポストシートは互いに球面接触となっているが、その理由は、水平地震と熱膨張差による高温プレナム部上下の構造物の相対変位を微小回転によって逃げる事が可能であり、かつポストに曲げと剪断力が加わるのを防ぎ軸力のみが作用するようにするためである。¹⁾

したがって、サポートポストは、原子炉の定常運転状態では、40気圧、平均1000℃の高温高圧Heガスにさらされる。また、燃料体とは異なって原子炉の寿命中、取り替えられることがないため、構造物として高い信頼性が要求される。

本実験では、サポートポストの静的圧縮破壊強度に及ぼす、軸長比、傾き角、球面座半径の影響を調べたのでそれを報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材及び試験片形状

本実験に使用した供試材は、等方性黒鉛（東洋炭素製IG-11）で、特に、素ブロックからのサポートポスト試験片採取方法を、図1に示す。切り出しにあたってはポストの軸長方向と素ブロックの強度の大きい方向を一致させた。これらの材料の機械的及び物理的特性を表1に示す。表中のnは試験片の数で、値は算術平均値である。表2は、化学成分表である。

図2は、試験片形状及び荷重負荷形式を模式的に表したものである。

試験に使用したポストの寸法を表3に示す。球面座半径の測定にはRゲージを使用した。

サポートポスト側面の表面あらさの代表的な例を図3に示す。測定には、万能表面形状測定機を用いた。

図4は試料黒鉛表面の偏光顕微鏡写真で、グリーンカーボランダム400番、及びアルミナ500番で研磨後撮影した。

2.2 圧縮試験機

静的圧縮破壊試験は、静的容量7.5 tonの電気油圧サーボ方式の試験機を使用した。サポートポスト試験片は、その両端において黒鉛製ポストシートと球面接触状態で設置し、-50kg

1. 緒 言

多目的高温ガス実験炉において、炉心を構成する燃料体、可動反射体は、1領域当たり3本の黒鉛よりなるサポートポストによって支持される。また、サポートポストにより形成される高温プレナムは、各領域よりジェット流となって流出してくる高温Heガスを混合させる機能も有している。

サポートポストとポストシートは互いに球面接触となっているが、その理由は、水平地震と熱膨張差による高温プレナム部上下の構造物の相対変位を微小回転によって逃げる事が可能であり、かつポストに曲げと剪断力が加わるのを防ぎ軸力のみが作用するようにするためである。¹⁾

したがって、サポートポストは、原子炉の定常運転状態では、40気圧、平均1000℃の高温高圧Heガスにさらされる。また、燃料体とは異なって原子炉の寿命中、取り替えられることがないため、構造物として高い信頼性が要求される。

本実験では、サポートポストの静的圧縮破壊強度に及ぼす、軸長比、傾き角、球面座半径の影響を調べたのでそれを報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材及び試験片形状

本実験に使用した供試材は、等方性黒鉛（東洋炭素製IG-11）で、特に、素ブロックからのサポートポスト試験片採取方法を、図1に示す。切り出しにあたってはポストの軸長方向と素ブロックの強度の大きい方向を一致させた。これらの材料の機械的及び物理的特性を表1に示す。表中のnは試験片の数で、値は算術平均値である。表2は、化学成分表である。

図2は、試験片形状及び荷重負荷形式を模式的に表したものである。

試験に使用したポストの寸法を表3に示す。球面座半径の測定にはRゲージを使用した。

サポートポスト側面の表面あらさの代表的な例を図3に示す。測定には、万能表面形状測定機を用いた。

図4は試料黒鉛表面の偏光顕微鏡写真で、グリーンカーボランダム400番、及びアルミナ500番で研磨後撮影した。

2.2 圧縮試験機

静的圧縮破壊試験は、静的容量7.5 tonの電気油圧サーボ方式の試験機を使用した。サポートポスト試験片は、その両端において黒鉛製ポストシートと球面接触状態で設置し、-50kg

程度の荷重で固定した。

なお、ポストの傾き θ の測定には、ダイヤルベベルプロトラクターを用い、2方向より測定した。

試験機のクロスヘッド速度は、ポスト長さ L に対し、ポスト中央部の公称実断面歪 $\dot{\epsilon}$ が 8.3×10^{-5} となるように調整した。この場合、鋼製治具に比較して、黒鉛製ポストシートのヤング率 E は、その20分の1程度であり、シートとの歪は無視できない。サポートポスト、ポストシートを設置した状態におけるポストの $\dot{\epsilon}$ は、おおよそ 5.6×10^{-6} となる。

ポスト中央部長手方向に取り付けた2枚の大歪ゲージ（ゲージ長さ = 5mm）より検出した荷重（及び、公称実断面応力 $-\sigma_g$ ）-歪曲線を図5に示す。2枚の大歪ゲージより検出された歪値は一致せず、破壊の近くではゲージ番号①と②の差は、約 6.7×10^{-3} 程度になっている。ポストが破壊したあと、番号①のゲージを取り付けた場所にも、長手方向に直角に割れが入り、ゲージ①は破断した。荷重-時間、時間-歪（ゲージ検出値の平均）より推定した、荷重-歪速度曲線を図6に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 ワイブル分布

以後のデータ整理に、ワイブル分布を使用しているので、それについて簡単に触れておく。

圧縮破壊強度 $-\sigma_{cr}$ の確率密度関数としてワイブルの仮定を採用すると、破壊強度 $-\sigma$ を越えない確率（累積分布関数） $F(-\sigma)$ は次のように表される。

$$F(-\sigma) = \int_{-\infty}^{-\sigma} f(-\sigma) d(-\sigma) \quad (1)$$

ここに、

$$f(-\sigma) = \alpha m (-\sigma)^{m-1} \exp \left\{ -\alpha (-\sigma)^m \right\}$$

$$-\sigma \geq 0, \quad \alpha > 0, \quad m > 1$$

$$\therefore F(-\sigma) = 1 - \exp \left\{ -\alpha (-\sigma)^m \right\}$$

平均値 $\bar{-\sigma}$ は

$$\bar{-\sigma} = \int_{-\infty}^{\infty} (-\sigma) f(-\sigma) d(-\sigma) = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (2)$$

標準偏差SDは、

$$SD = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここでは、 $F(-\sigma)$ として次式を用いた。

程度の荷重で固定した。

なお、ポストの傾き θ の測定には、ダイヤルベベルプロトラクターを用い、2方向より測定した。

試験機のカロスヘッド速度は、ポスト長さ L に対し、ポスト中央部の公称実断面歪 $\dot{\epsilon}$ が 8.3×10^{-5} となるように調整した。この場合、鋼製治具に比較して、黒鉛製ポストシートのヤング率 E は、その20分の1程度であり、シートとの歪は無視できない。サポートポスト、ポストシートを設置した状態におけるポストの $\dot{\epsilon}$ は、おおよそ 5.6×10^{-6} となる。

ポスト中央部長手方向に取り付けた2枚の大歪ゲージ（ゲージ長さ = 5mm）より検出した荷重（及び、公称実断面応力 σ_g ）-歪曲線を図5に示す。2枚の大歪ゲージより検出された歪値は一致せず、破壊の近くではゲージ番号①と②の差は、約 6.7×10^{-3} 程度になっている。ポストが破壊したあと、番号①のゲージを取り付けた場所にも、長手方向に直角に割れが入り、ゲージ①は破断した。荷重-時間、時間-歪（ゲージ検出値の平均）より推定した、荷重-歪速度曲線を図6に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 ワイブル分布

以後のデータ整理に、ワイブル分布を使用しているため、それについて簡単に触れておく。

圧縮破壊強度 $-\sigma_{cr}$ の確率密度関数としてワイブルの仮定を採用すると、破壊強度 $-\sigma$ を越えない確率（累積分布関数） $F(-\sigma)$ は次のように表される。

$$F(-\sigma) = \int_{-\infty}^{-\sigma} f(-\sigma) d(-\sigma) \quad (1)$$

ここに、

$$f(-\sigma) = \alpha m (-\sigma)^{m-1} \exp \left\{ -\alpha (-\sigma)^m \right\}$$

$$-\sigma \geq 0, \quad \alpha > 0, \quad m > 1$$

$$\therefore F(-\sigma) = 1 - \exp \left\{ -\alpha (-\sigma)^m \right\}$$

平均値 $\bar{-\sigma}$ は

$$\bar{-\sigma} = \int_{-\infty}^{\infty} (-\sigma) f(-\sigma) d(-\sigma) = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (2)$$

標準偏差SDは、

$$SD = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここでは、 $F(-\sigma)$ として次式を用いた。

$$F(-\sigma) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (4)$$

試験の全ケースについて、ワイブル確率紙に実験点を示し、最小自乗法で整理した直線を、図7～14に示す。表4には、ワイブル確率紙における直線の傾き(m)、切片(a)及び平均値、標準偏差の値を示す。

3.2 軸長主断面二次半径の影響

明瞭な降伏点を持たない材料の短柱座屈実験に対して、Tetmajer, Rankine は次の式(5)、(6)を各々提案している。形状は丸棒、境界条件は両端回転自由として、

$$-\sigma_{cr} = b - c \left(\frac{l}{k} \right) \quad (5)$$

$$-\sigma_{cr} = \frac{b'}{1 + c' \left(\frac{l}{k} \right)^2} \quad (6)$$

である。

このとき、 $r_s = 25.5 \text{ mm}$, $r_p = 25.0 \text{ mm}$, $D = 25.0 \text{ mm}$ で $L = 100, 150, 200 \text{ mm}$ のポストの破壊応力をワイブル分布の平均値に基づいて、最小自乗法により上式の各係数を求めると、

$$\begin{aligned} b &= 9.075 \\ c &= 0.819 \\ b' &= 8.312 \\ c' &= 0.00028 \end{aligned}$$

となる。

実験の範囲内では、どちらの式でも整理されるが、供試材である黒鉛の圧縮強さが -8.82 kg/mm^2 であるから、実験範囲外の値を推定する場合には式(6)の方が良いと考えられる。これらの結果を図15に示す。 L/k の増加とともに、 $-\sigma_{cr}$ は減少していくことがわかる。なお、円柱の場合は、

$$\frac{L}{k} = 4 \frac{L}{D} \quad (7)$$

である。

3.3 ポストの傾き角の影響

炉心組時及び炉の運転時を含めて、サポートポストは正しく垂直であることはなく、必ず傾いた状態にあると考えられる。そのため、傾いた状態での破壊強度を評価することが必要となってくる。この試験装置では、サポートポスト下方の治具をスライドさせることによって、任意の角度に傾けることが可能である。(図18参照)。

試験にあたっては、あらかじめ傾き角を $1^{\circ}30'$ 、 $3^{\circ}30'$ 程度に設定し、試験片を取り付けてからダイヤルベベルプロトラクターを用いて θ の測定を行った。 θ が零でない、負荷荷重が増大するに従って、 θ も増大する傾向にある。荷重を加えながら連続的に θ を測定すると、例えば $\theta = 3^{\circ}30'$ で、負荷応力が破壊応力の70%程度になったとき、 θ は更に $30'$ ほど増加していた。

破壊時の θ が不明なので、ここでは、設定時の θ と破壊応力の関係を調べた。それを図16に示す。設定角が $1^{\circ}30'$ と 0° では、両者の破壊応力の分布に差異は認められ難いが、 $3^{\circ}30'$ では、破壊応力の低下が認められる。

3.4 ポスト・シートの半径が及ぼす影響

球面接触理論²⁾によれば、接触半径 a 、最大圧力 P_{max} は、

$$a \propto \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

$$P_{max} \propto \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)^{\frac{2}{3}}$$

に比例する。

破壊時における $\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)$ 及び r_p 、 r_s の大きさと破壊応力の関係を図17に示す。これより、破壊応力の大きさは、 $\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)$ の影響を受けないことがわかる。また $r_p = 25.0\text{mm}$ と 75.0mm のデータの比較により、 r_p が大きいほど $-\sigma_{cr}$ は低くなる傾向がある。

3.5 破壊後のポスト破面

第18図は破壊させてなお試験機に取り付けたままの状態のサポートポストを示す。図ではポスト下端の球面座付近で破壊しているが、必ずしも、下端だけでなく上端で破壊したポストもある。

図19は、ポスト破片およびシート球面座に残った圧痕を示している。図19(a)図のようにポストは、その端部で破壊し、細かい破片、粉末に分解している。破壊した近くの球面座はシートの接触部を底面にした円錐形状を呈している。(図19(b), (c), (e), (f))。図19(d)は、シート球面座の圧痕を示す。

図20は図19(a), (d)のスケッチであるが、矢印で示された場所より切り出した破面の走査型電子顕微鏡写真を、図21～図28に示す。図21～図25は、図20 A部の破面写真である。図21, 図22はポスト球面座縁の破面である。図23～図24は、その縁の拡大写真であり、図24には針状コークスが見られる。図25は縁より4mmの離れた場所の写真であるが、針状コークスの群及びき裂がみられる。図26は、図20 B部の破面写真である。やはり破面にき裂がみられる。図27～図28は、図20 C部の破面写真である。図27には針状コークスがみられる。図28にはき裂がみられる。A, B, C各部の破面に顕著な差は認められなかったが、各部に針状

コークス、微視き裂がみられた。

4. 結 論

サポートポスト、ポストシートモデルにより、ポストの静的圧縮破壊試験を行い、次の結果を得た。なお、統計処理に際してはワイブル分布を用いた。

- 1) ポストの直径を一定にして(25mm)、ポスト長さを変えた場合、軸長/主断面二次半径が増加するほど、破壊応力 $-\sigma_{cr}$ は低下する。
- 2) ポストの傾きが $-\sigma_{cr}$ に及ぼす影響については、傾き角が零でない場合、負荷荷重の増大とともに傾きは増す傾向にある。したがって、初めの設定角と $-\sigma_{cr}$ の関係を調べたところ設定角の増大とともに、 $-\sigma_{cr}$ は低下する傾向がある。
- 3) 弾性接触問題については、球面接触圧力の最大値は、

$$\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)^B \text{ に比例するが、実験の範囲内で、} -\sigma_{cr} \text{ は } \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right) \text{ の値}$$

により変化しなかった。また、 r_p の大きさが大きいほど、 $-\sigma_{cr}$ は低い値となるようである。

- 4) ポスト破片を観察したところ、破壊したポスト端の球面座は、円錐形状を呈している。また、シートの球面座にはポスト球面座との圧痕が見られた。破面には針状コークス及び微視き裂が観察された。

本研究を実施するにあたり、実験に際しては研究炉管理部研究炉技術課井川博雅氏、また破面の写真撮影に際しては高温工学部高温材料強度研究室深谷清氏の御協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 青地哲男他：JAERI-M 6845 (1977)。
- 2) Timoshenko and Goodier : Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Co., New York (1970)。

コークス、微視き裂がみられた。

4. 結 論

サポートポスト、ポストシートモデルにより、ポストの静的圧縮破壊試験を行い、次の結果を得た。なお、統計処理に際してはワイブル分布を用いた。

- 1) ポストの直径を一定にして (25mm)、ポスト長さを変えた場合、軸長/主断面二次半径が増加するほど、破壊応力 $-\sigma_{cr}$ は低下する。
- 2) ポストの傾きが $-\sigma_{cr}$ に及ぼす影響については、傾き角が零でない場合、負荷荷重の増大とともに傾きは増す傾向にある。したがって、初めの設定角と $-\sigma_{cr}$ の関係を調べたところ設定角の増大とともに、 $-\sigma_{cr}$ は低下する傾向がある。
- 3) 弾性接触問題については、球面接触圧力の最大値は、

$$\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)^B \text{ に比例するが、実験の範囲内で、} -\sigma_{cr} \text{ は } \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right) \text{ の値}$$

- により変化しなかった。また、 r_p の大きさが大きいほど、 $-\sigma_{cr}$ は低い値となるようである。
- 4) ポスト破片を観察したところ、破壊したポスト端の球面座は、円錐形状を呈している。また、シートの球面座にはポスト球面座との圧痕が見られた。
破面には針状コークス及び微視き裂が観察された。

本研究を実施するにあたり、実験に際しては研究炉管理部研究炉技術課井川博雅氏、また破面の写真撮影に際しては高温工学部高温材料強度研究室深谷清氏の御協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 青地哲男他：JAERI-M 6845 (1977)。
- 2) Timoshenko and Goodier : Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Co., New York (1970)。

コークス、微視き裂がみられた。

4. 結 論

サポートポスト、ポストシートモデルにより、ポストの静的圧縮破壊試験を行い、次の結果を得た。なお、統計処理に際してはワイブル分布を用いた。

- 1) ポストの直径を一定にして (25mm)、ポスト長さを変えた場合、軸長/主断面二次半径が増加するほど、破壊応力 $-\sigma_{cr}$ は低下する。
- 2) ポストの傾きが $-\sigma_{cr}$ に及ぼす影響については、傾き角が零でない場合、負荷荷重の増大とともに傾きは増す傾向にある。したがって、初めの設定角と $-\sigma_{cr}$ の関係を調べたところ設定角の増大とともに、 $-\sigma_{cr}$ は低下する傾向がある。
- 3) 弾性接触問題については、球面接触圧力の最大値は、

$$\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right)^B \text{ に比例するが、実験の範囲内で、} -\sigma_{cr} \text{ は } \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s} \right) \text{ の値}$$

- により変化しなかった。また、 r_p の大きさが大きいほど、 $-\sigma_{cr}$ は低い値となるようである。
- 4) ポスト破片を観察したところ、破壊したポスト端の球面座は、円錐形状を呈している。また、シートの球面座にはポスト球面座との圧痕が見られた。
破面には針状コークス及び微視き裂が観察された。

本研究を実施するにあたり、実験に際しては研究炉管理部研究炉技術課井川博雅氏、また破面の写真撮影に際しては高温工学部高温材料強度研究室深谷清氏の御協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 青地哲男他：JAERI-M 6845 (1977)。
- 2) Timoshenko and Goodier : Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Co., New York (1970)。

Table 1 Characteristics of the graphite bulk for support post

items	value	n
apparent density	1.791	5
Shore hardness	59	2
electric resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)	1145	5
bending strength (kg/mm^2)	4.64	5
compressive strength (kg/mm^2)	8.82	5
tensile strength (kg/mm^2)	2.65	2
Young's modulus (kg/mm^2)	1056	2
ash (%)	0.14	2

n: number of test pieces

Table 2 Chemical compositions

element	value (ppm)
B	1
Si	58
Fe	11
Al	104
Ca	240
Mg	0.6
Ni	1.8
V	9.2
Ti	152
ash	1098

Table 3 Support post dimension
(mm)

D	r _p	r _s	L
25.0	25.0	25.2	150
25.0	25.0	25.5	150
25.0	25.0	25.8	150
25.0	50.0	52.0	150
25.0	75.0	76.8	150
25.0	75.0	79.7	150
25.0	75.0	82.7	150
25.0	25.0	25.5	100
25.0	25.0	25.5	200

Table 4 Experimental values of m and a, and mean values of fracture strength and their standard deviation

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(-\sigma)} = m \ln(-\sigma) + a$$

r _p	r _s	L	m	a	mean value	standard deviation
25.0	25.2	150	26.00	-52.25	7.30	0.31
25.0	25.5	150	21.80	-43.43	7.14	0.41
25.0	25.8	150	47.94	-95.68	7.28	0.19
75.0	76.8	150	40.08	-77.18	6.78	0.21
75.0	79.7	150	36.23	-70.56	6.90	0.29
75.0	82.7	150	37.86	-73.01	6.77	0.16
25.0	25.5	100	41.42	-85.27	7.75	0.23
25.0	25.5	200	78.77	-147.3	6.44	0.18

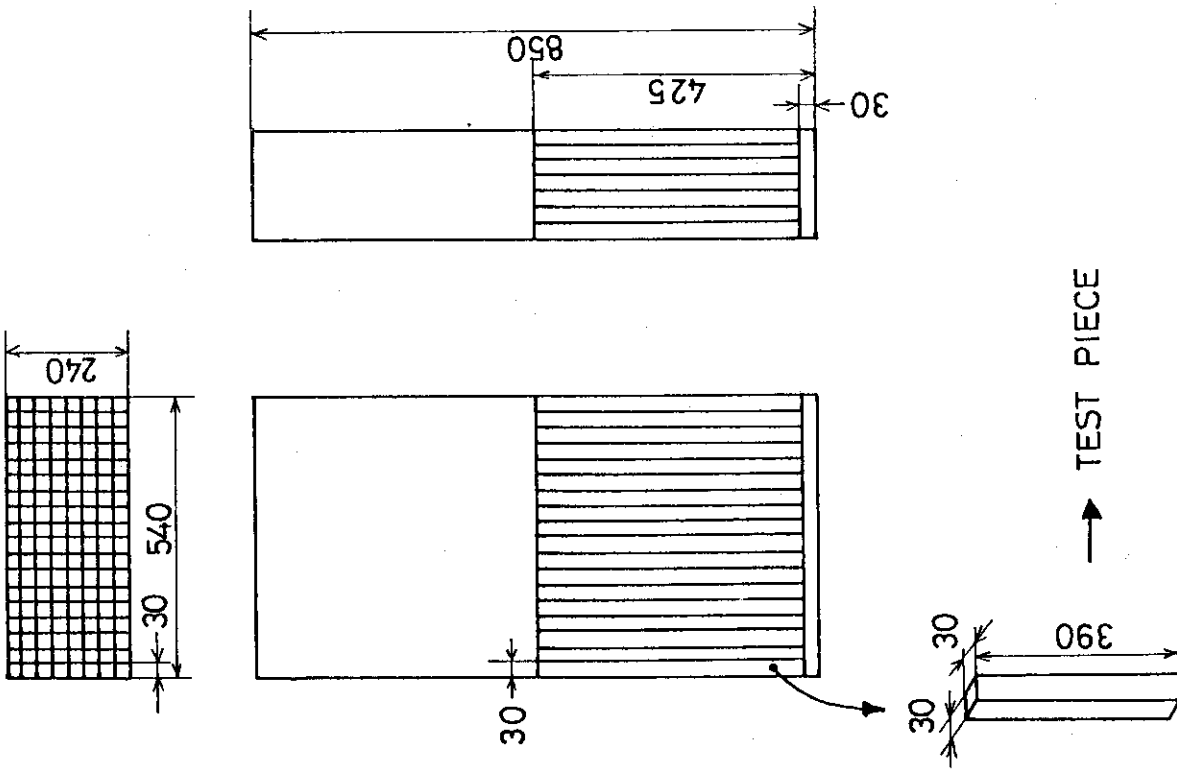


Fig. 1 Cutting of graphite block

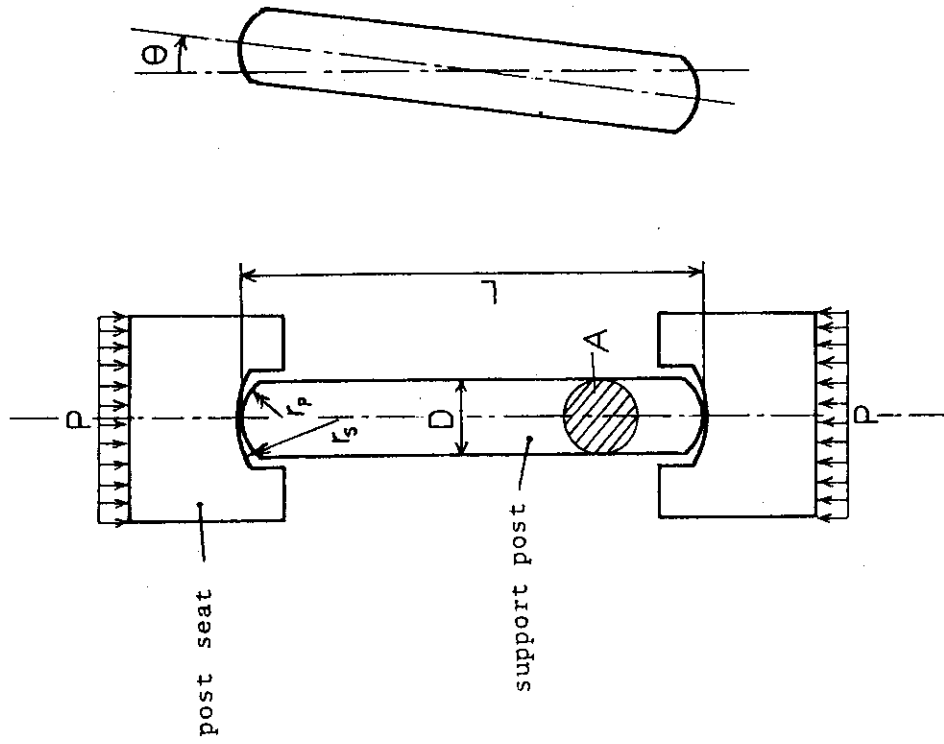
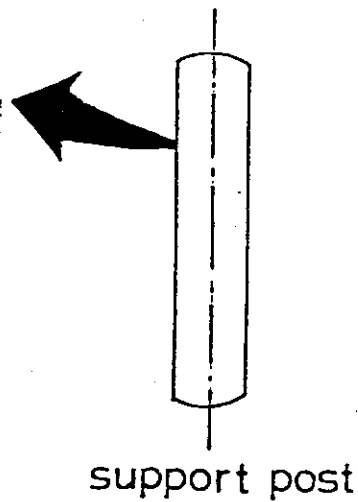
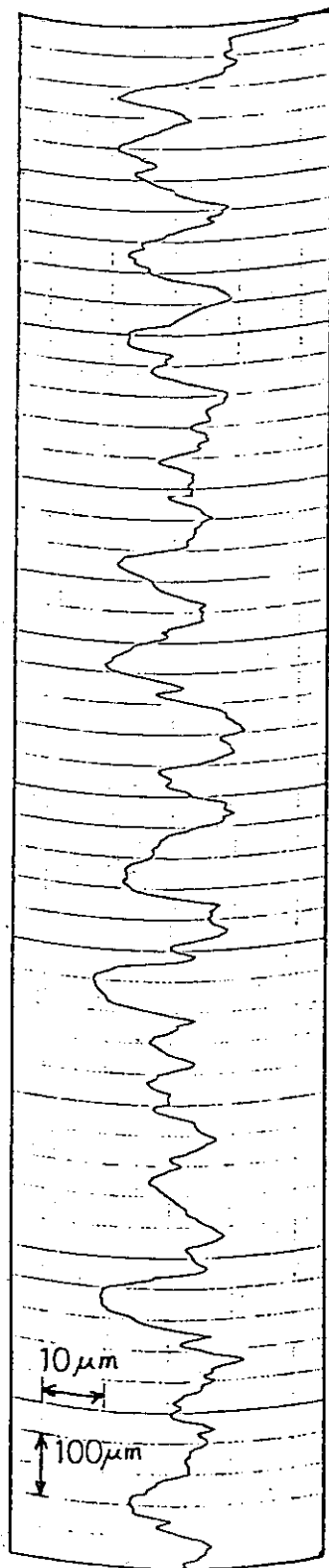


Fig. 2 Test piece and load diagram

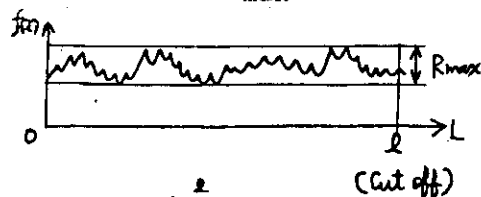


Cut off ; 0.8mm

Magnification(MGNF); X1000

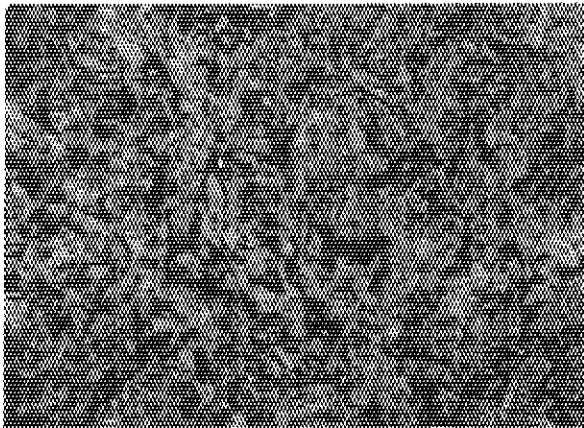
Center line average height(R_a) ; 49μm

Maximum height(R_{max}); 33μm



$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx$$

Fig. 3 Roughness curve



100 μ

Fig.4 Polarizing microscope photo of a graphite test piece (IG-11)

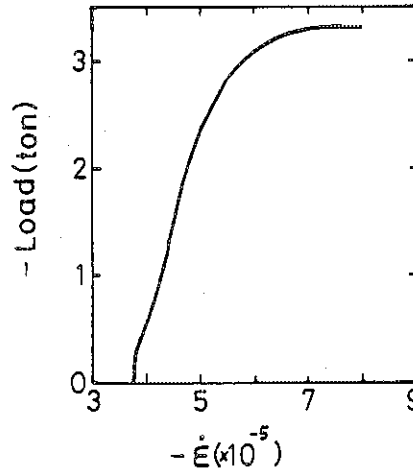


Fig.6 Strain rate estimated

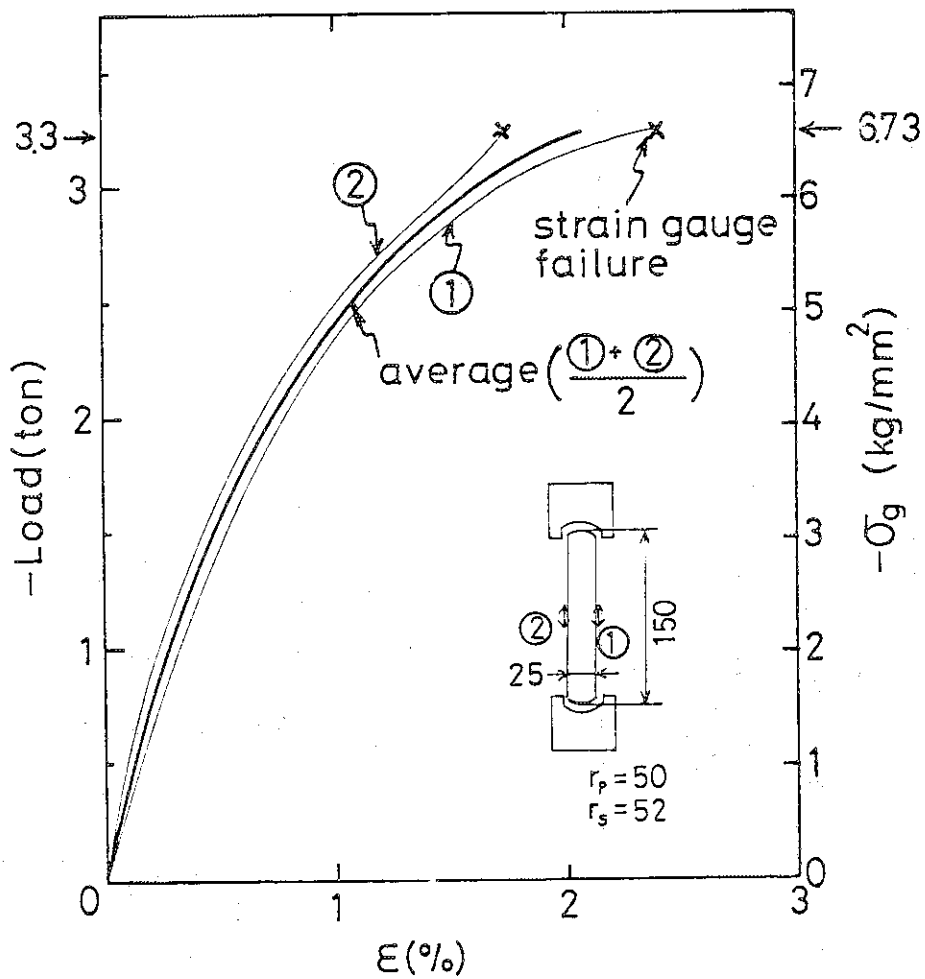


Fig.5 Load(stress) - strain curve
strain gauge used; KYOWA KFE-5-C1

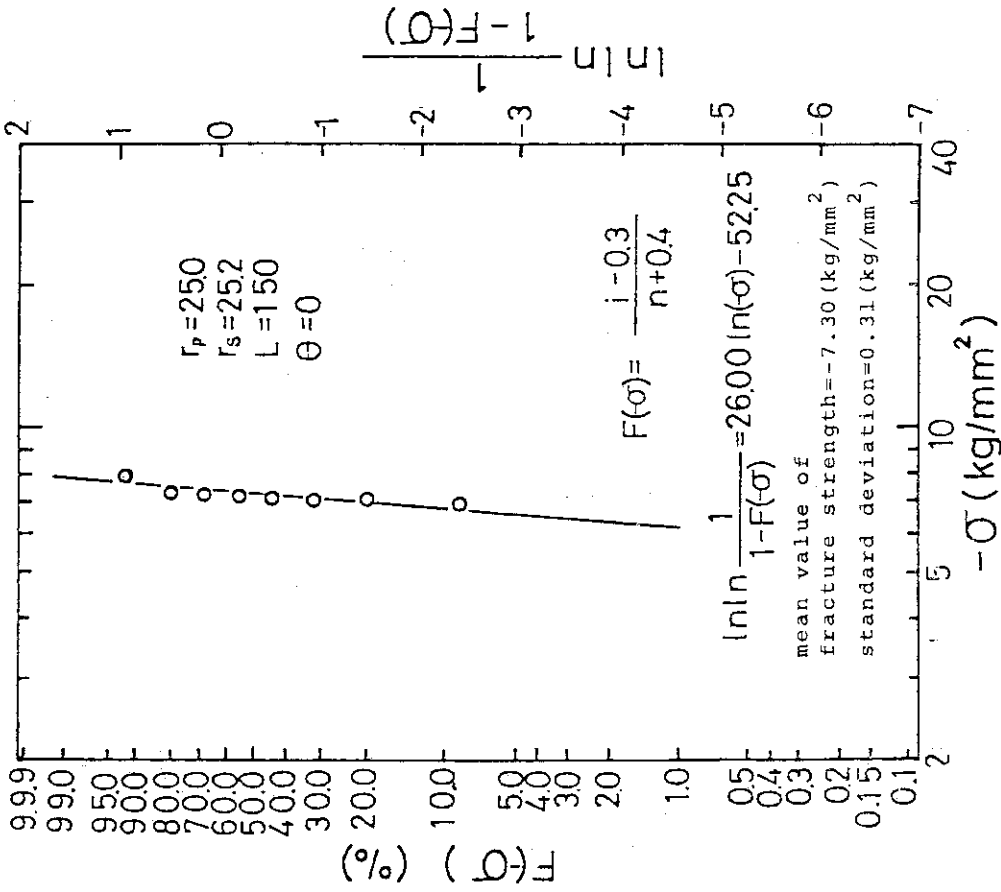


Fig. 7 Weibull distribution

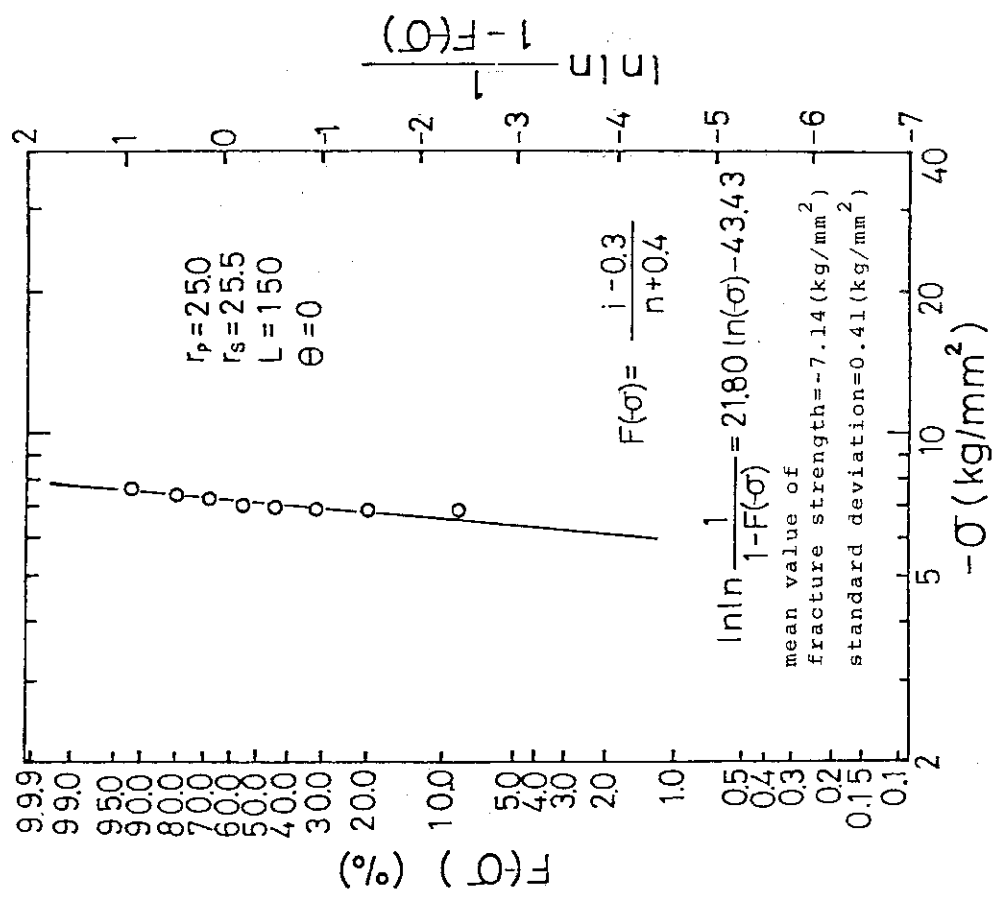


Fig. 8 Weibull distribution

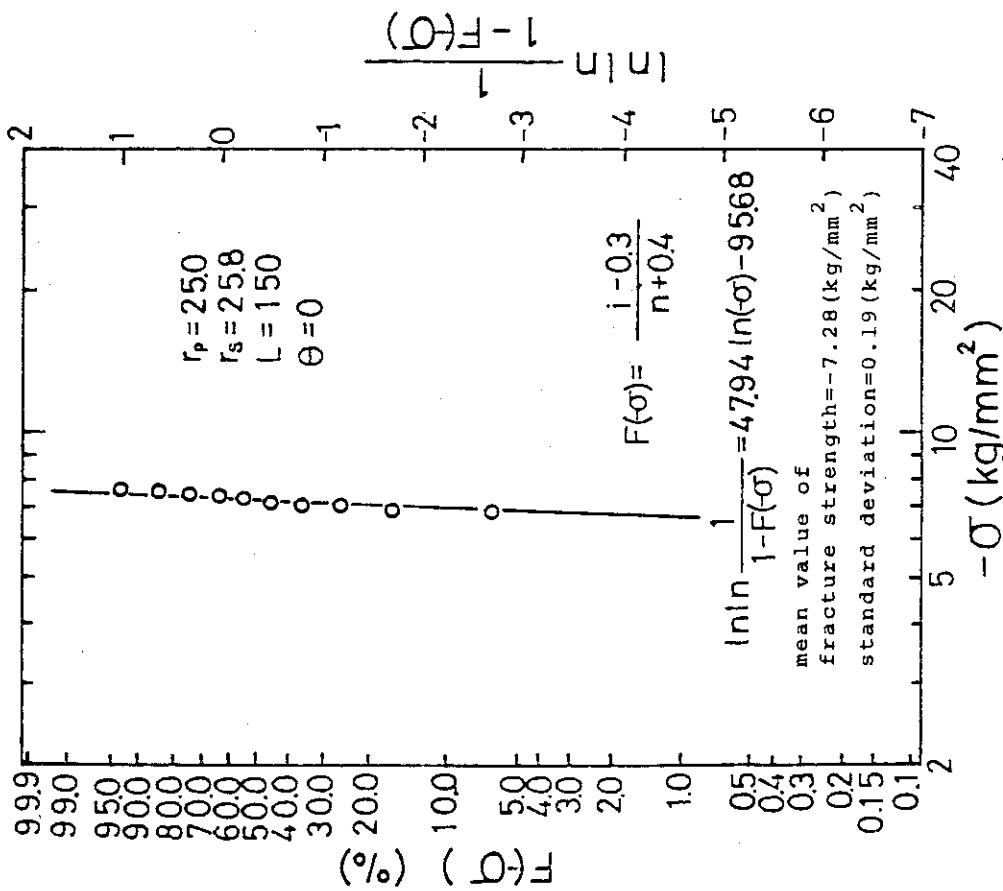


Fig.9 Weibull distribution

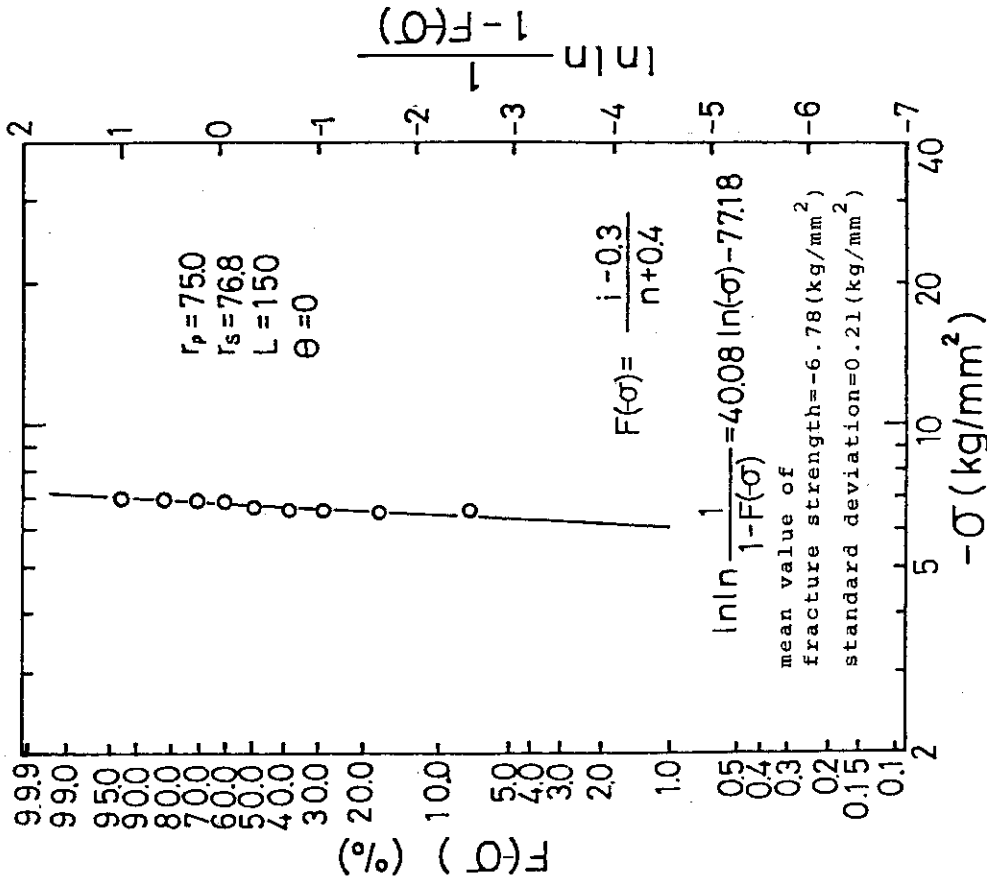


Fig.10 Weibull distribution

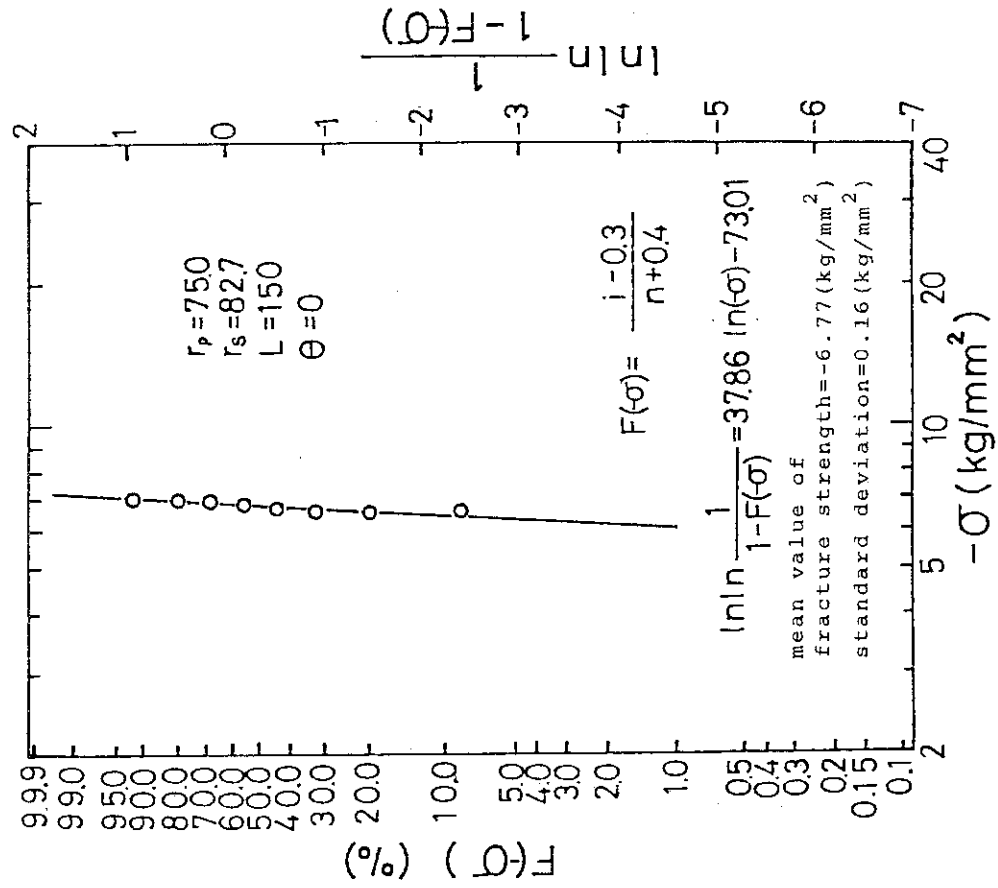


Fig.11 Weibull distribution

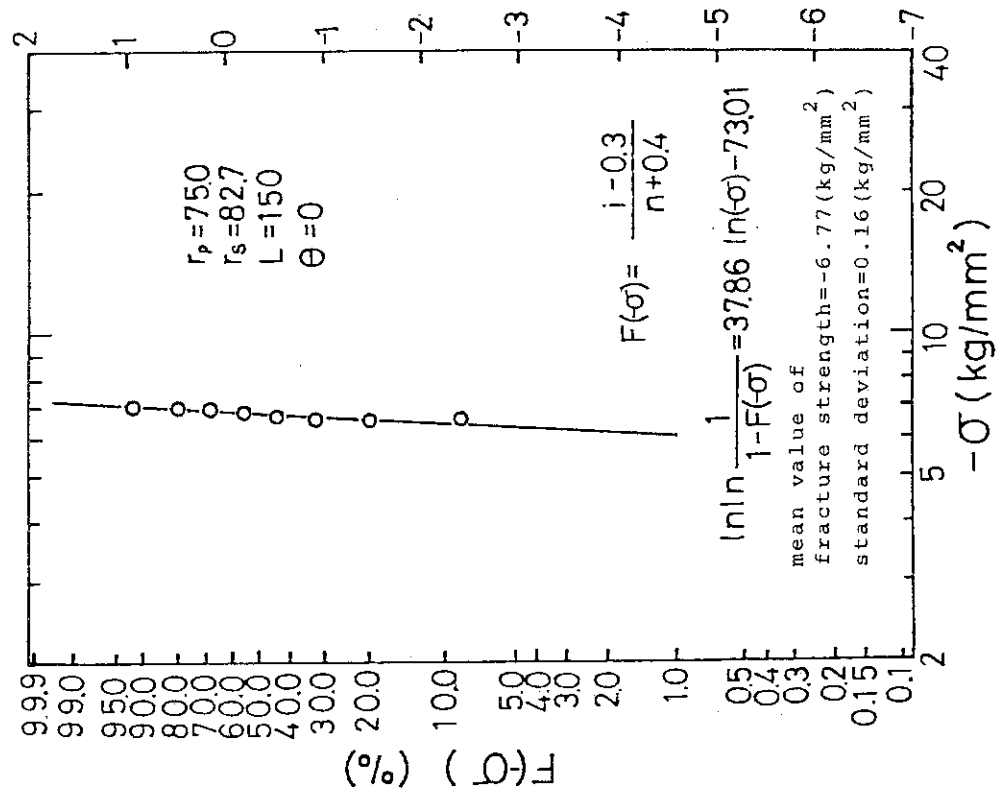


Fig.12 Weibull distribution

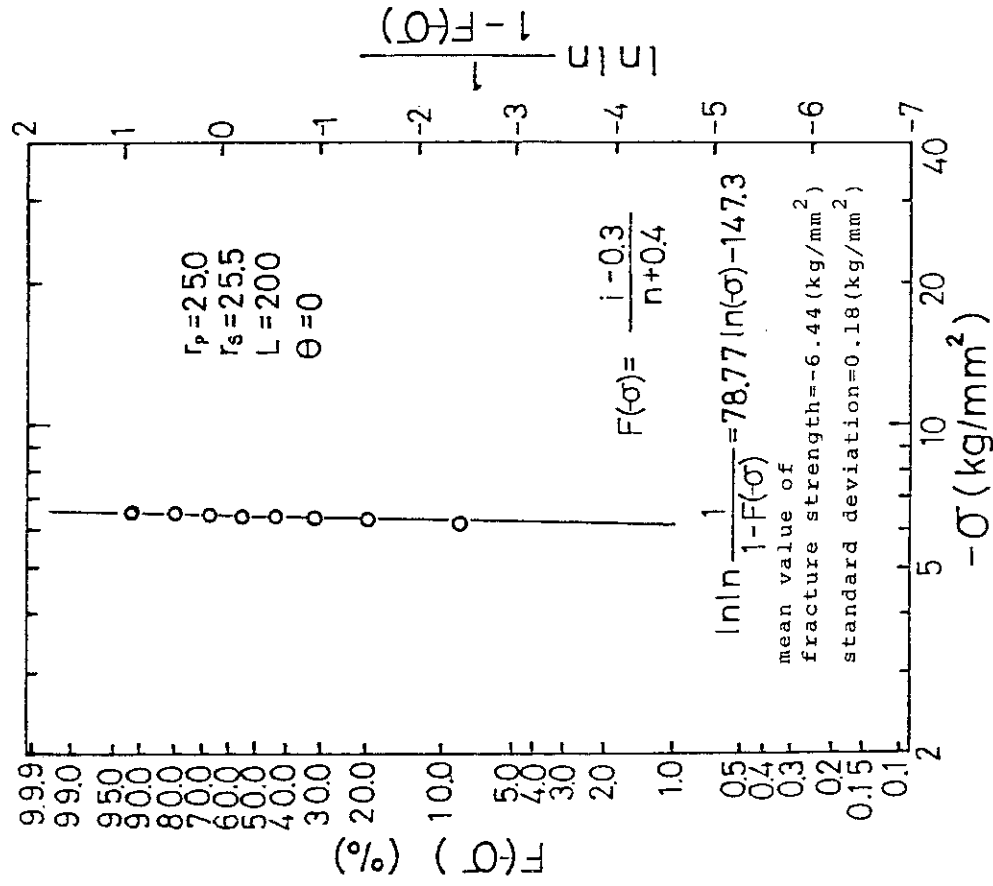


Fig.14 Weibull distribution

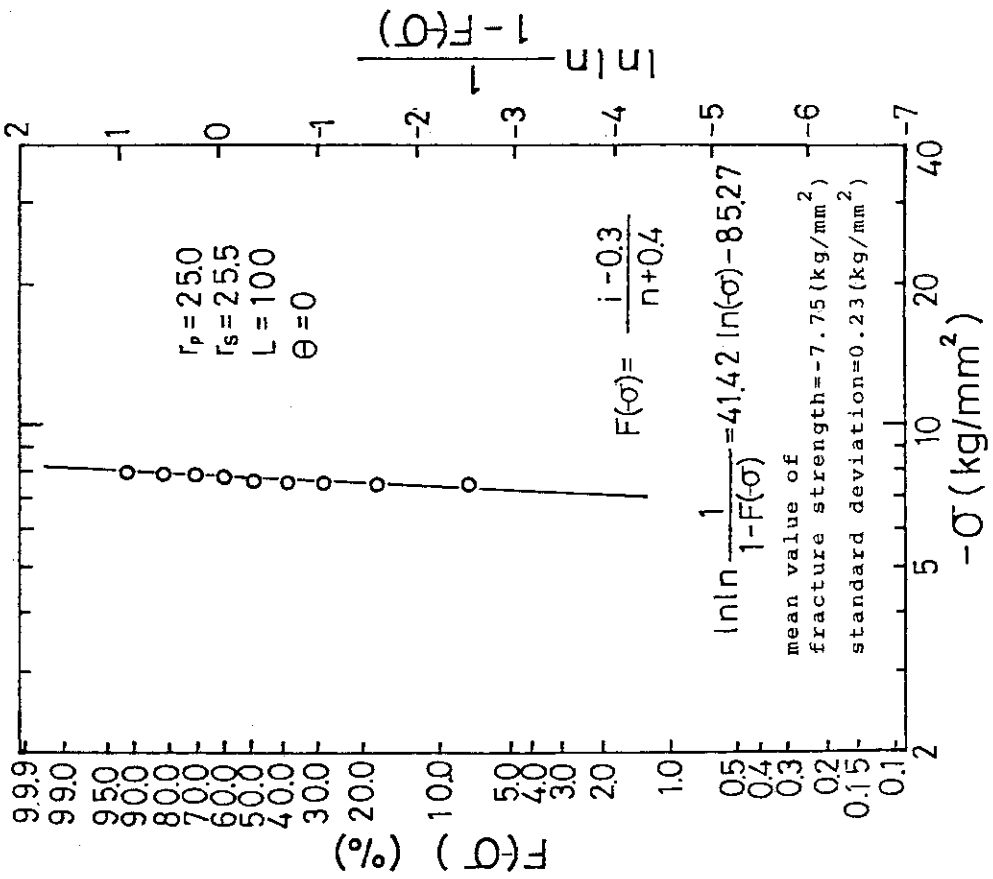


Fig.13 Weibull distribution

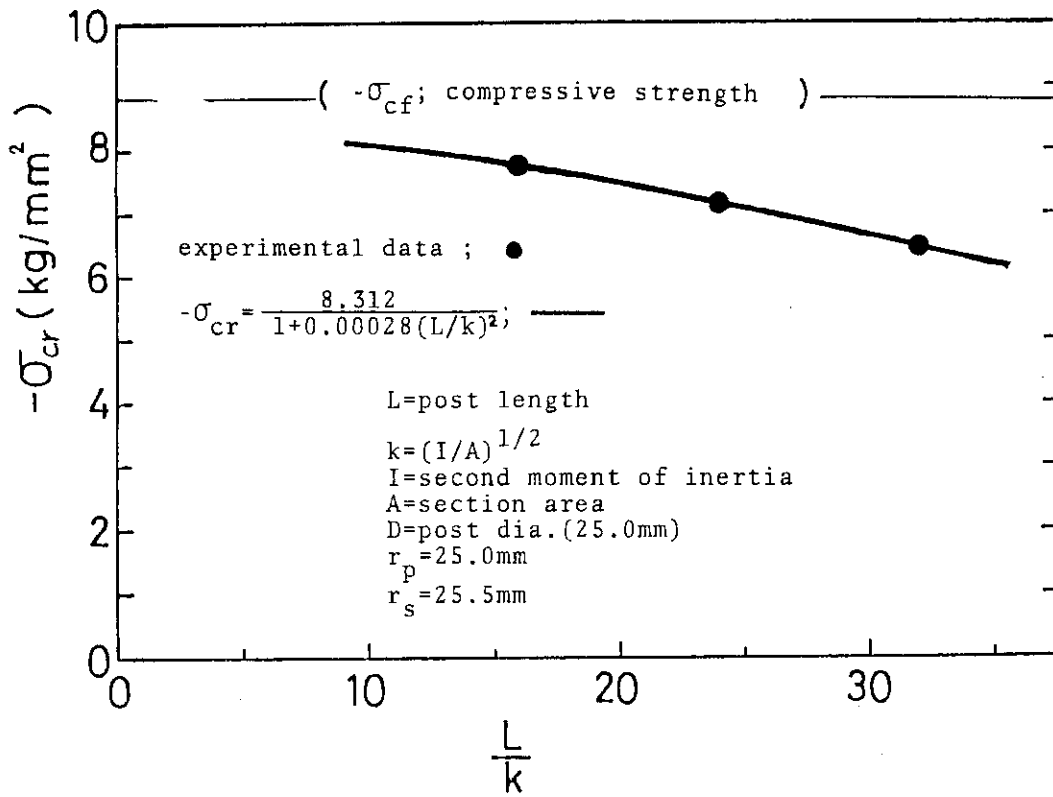


Fig.15 (L/k) effect to fracture strength

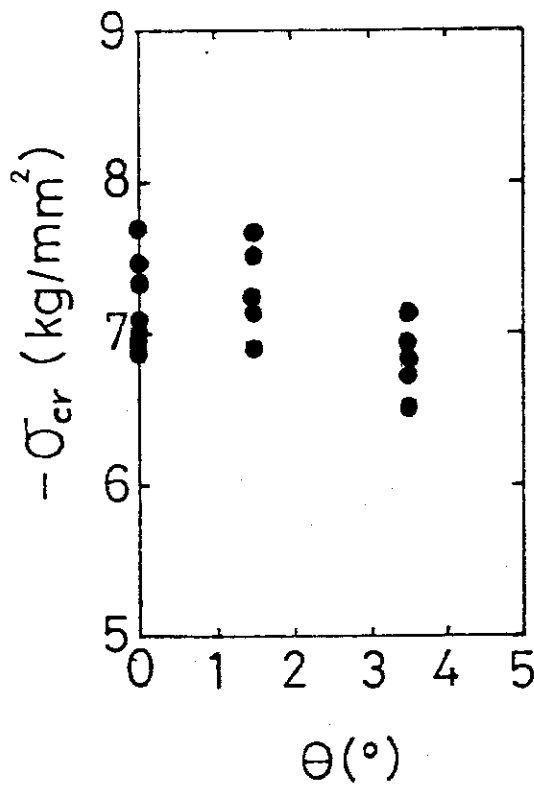


Fig.16 The effect of setting angle on fracture strength
 ($r_p = 25.0$, $r_s = 25.5$, $L = 150$)

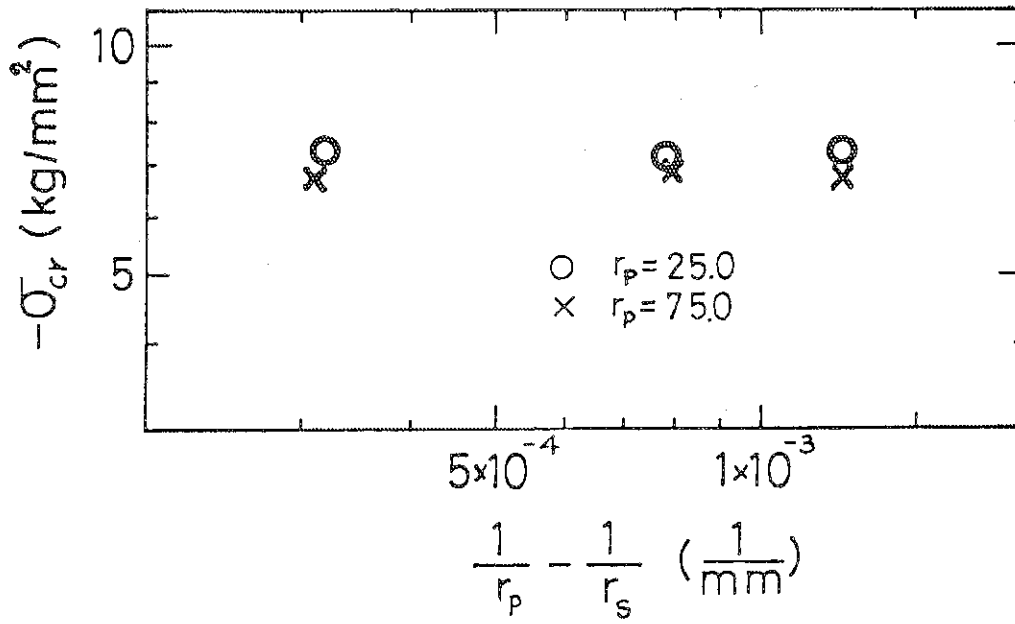


Fig.17 Dimensional effect to fracture strength (L=150)

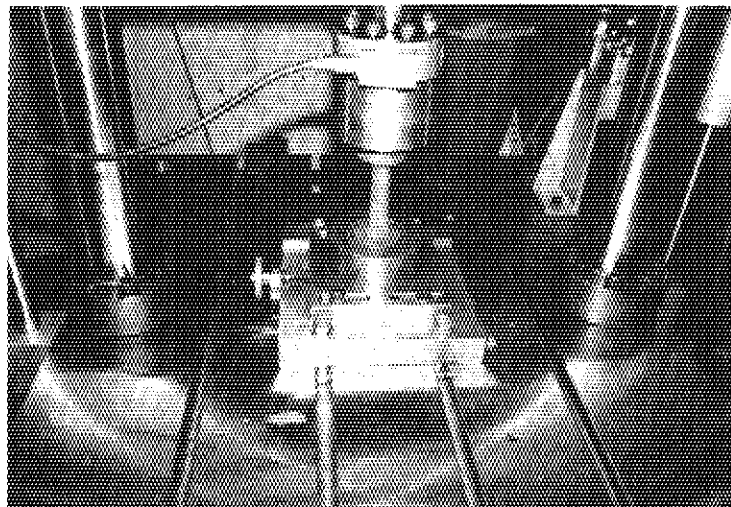
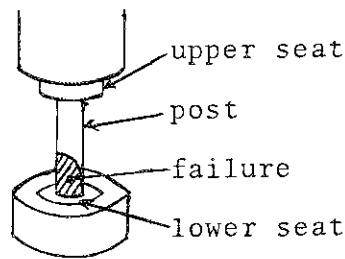


Fig.18 Support post after failure

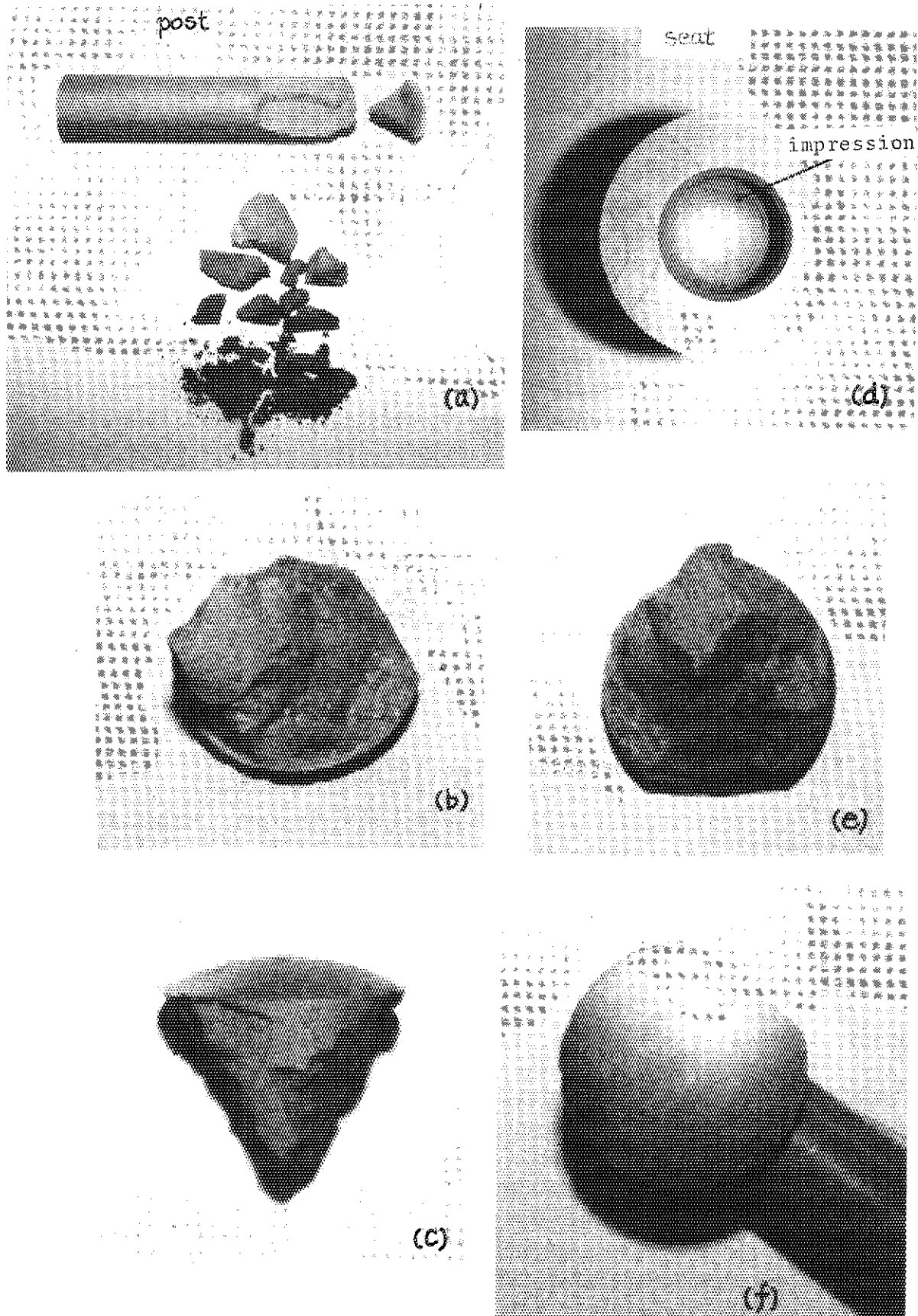
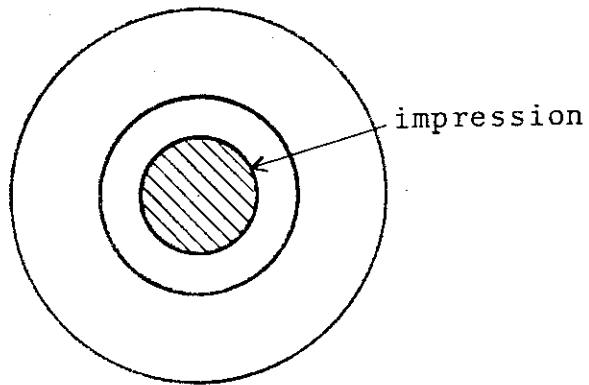


Fig. 19 Broken test piece

POST SEAT



SUPPORT POST

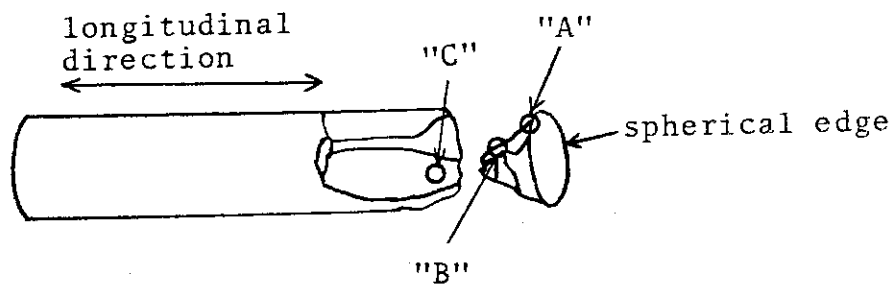


Fig.20 The sketch of Figs.19(a) and (d)

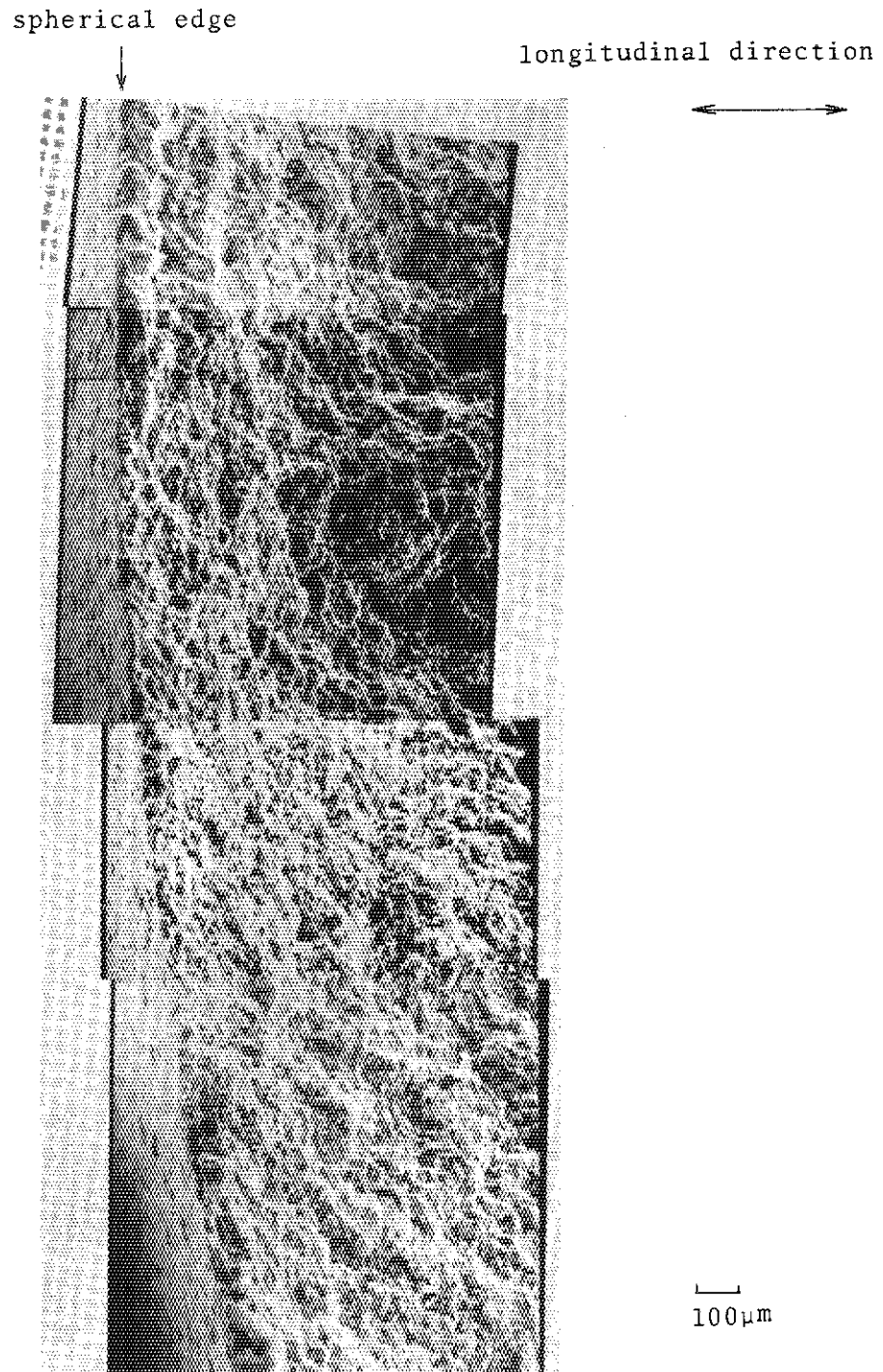


Fig. 21 Scanning electron micrographs of fracture surface near the spherical edge

spherical edge

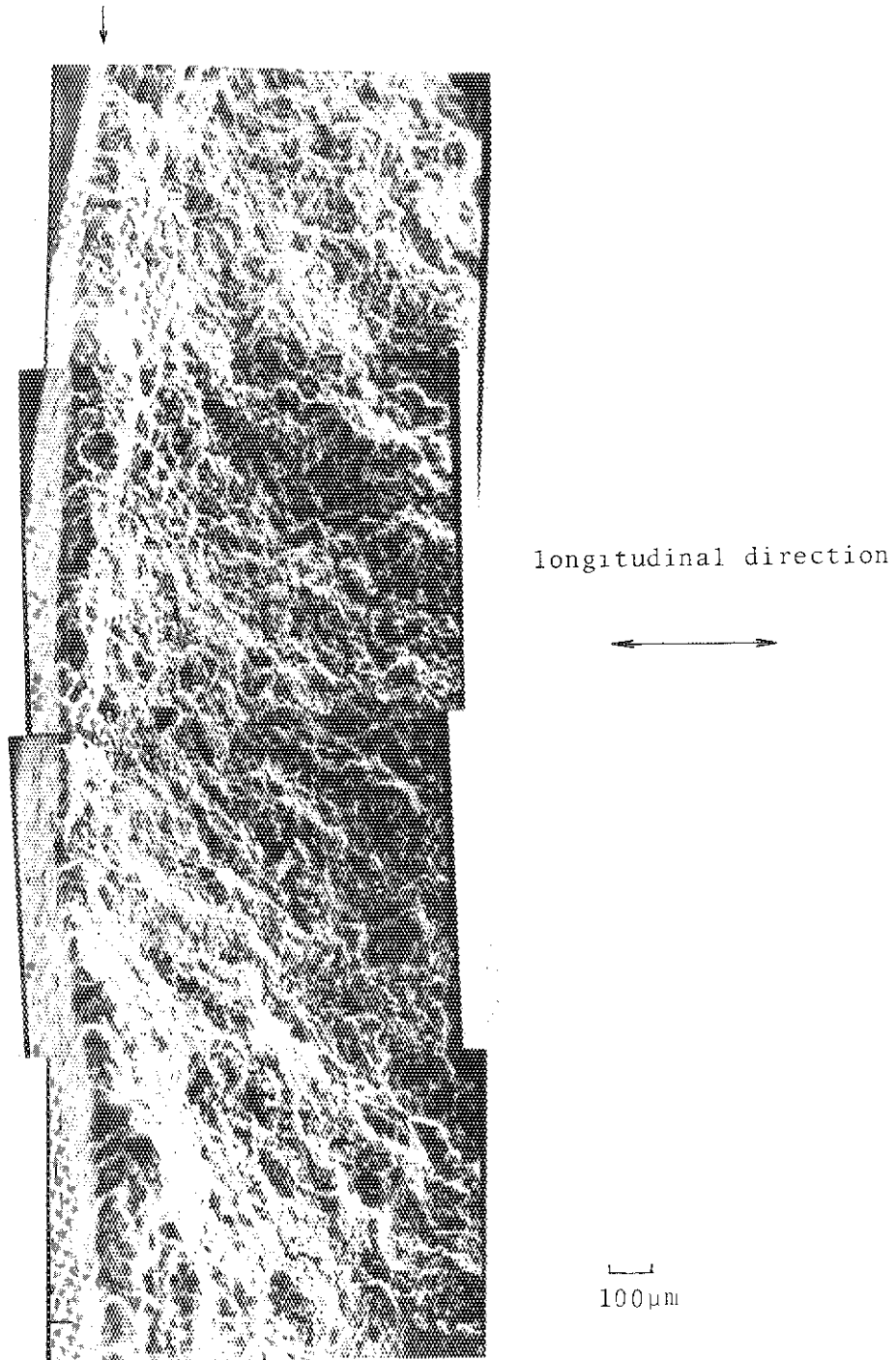


Fig. 22 Scanning electron micrograph of fracture surface near the spherical edge

longitudinal direction

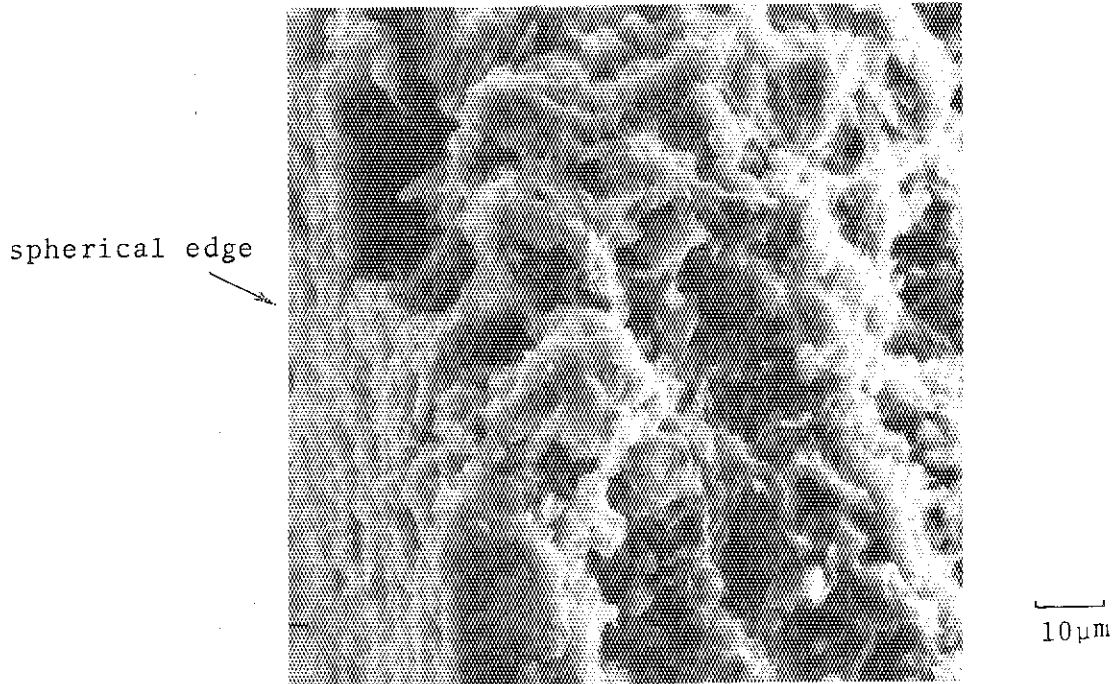


Fig. 23 Scanning electron micrograph of fracture surface near the spherical edge

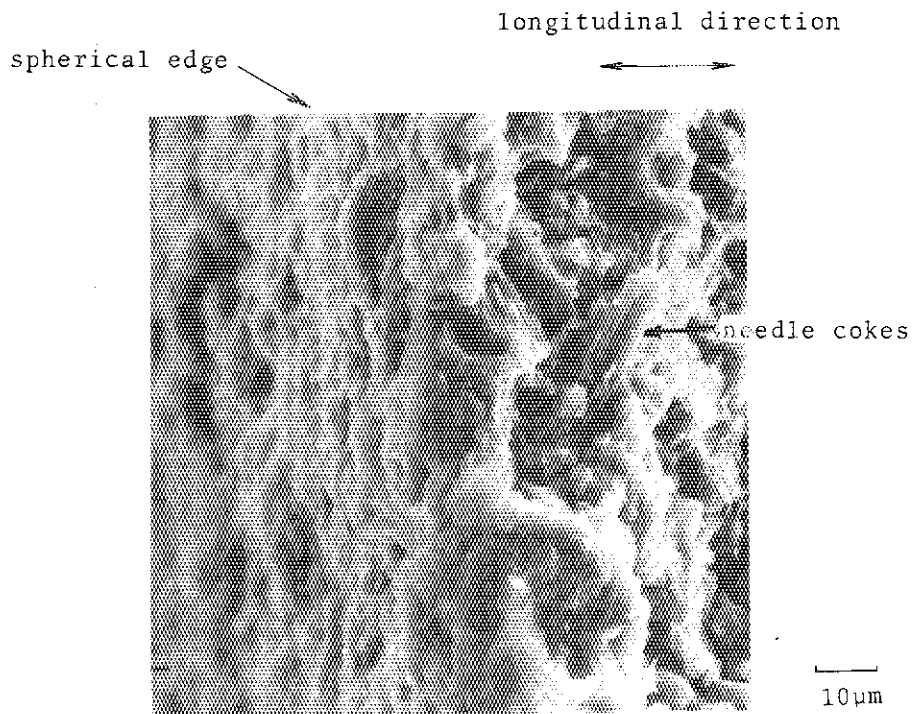
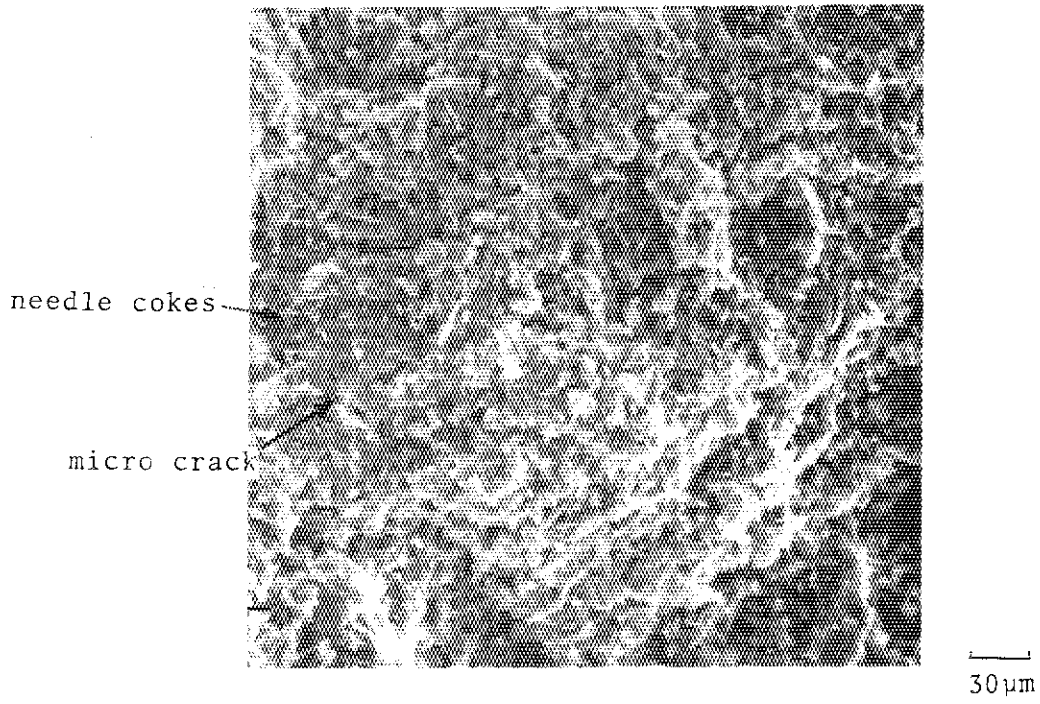
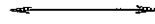
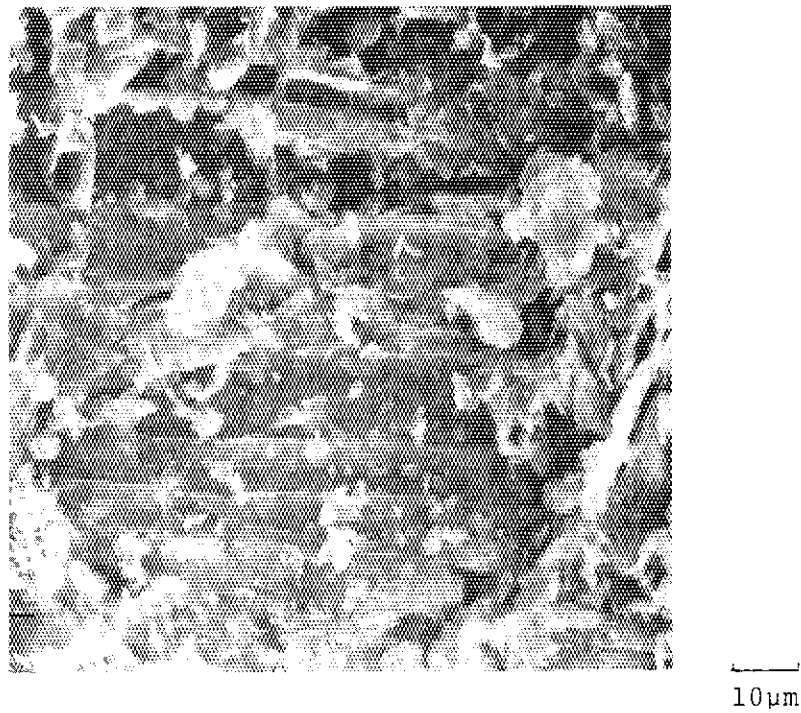


Fig. 24 Scanning electron micrograph of fracture surface near the spherical edge

longitudinal direction



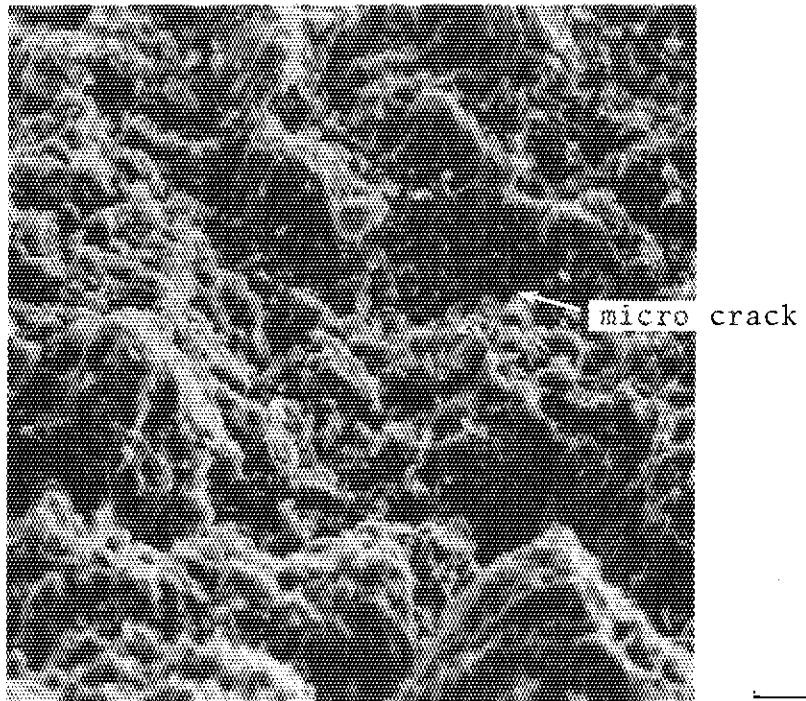
(a)



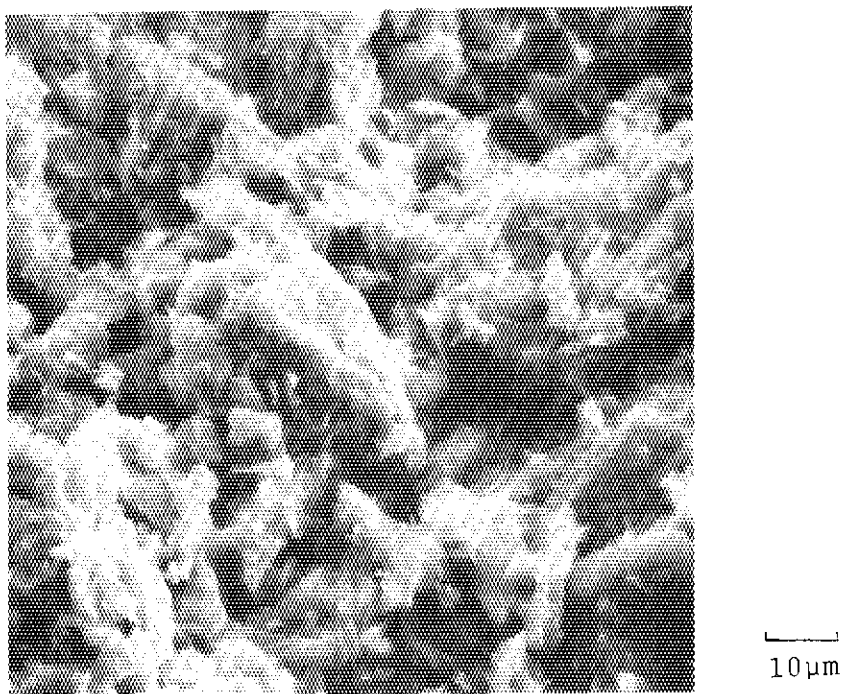
(b)

Fig. 25 Scanning electron micrographs of fracture surface;
distance from the spherical edge is 4mm

longitudinal direction



(a)



(b)

Fig.26 Scanning electron micrographs of fracture surface

longitudinal direction

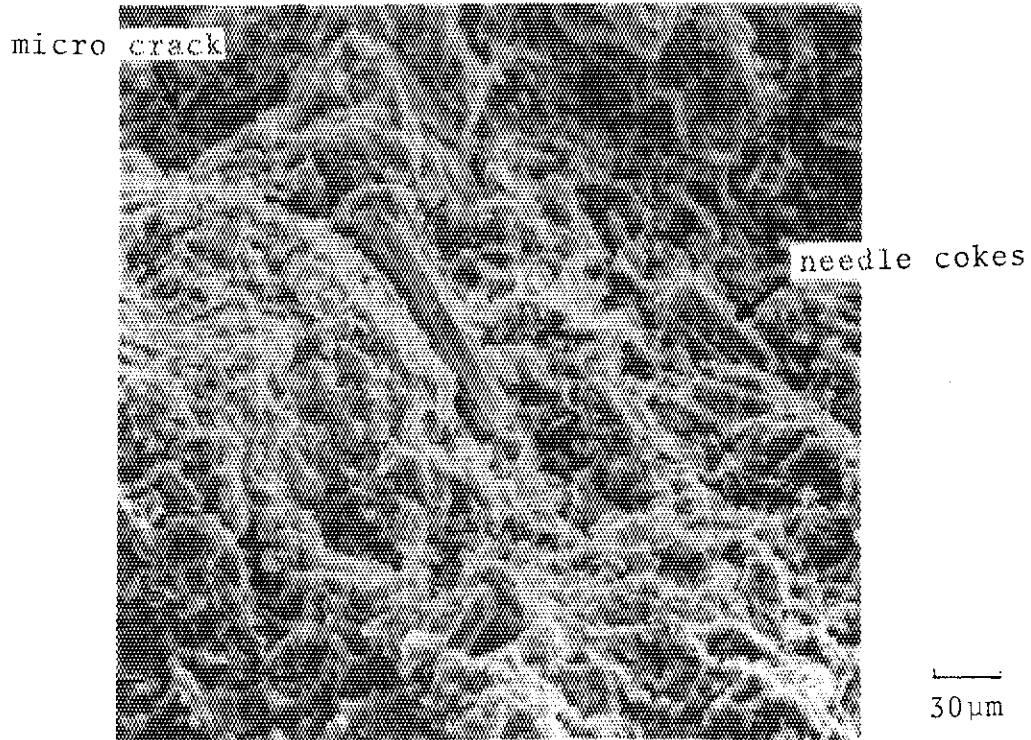
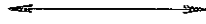
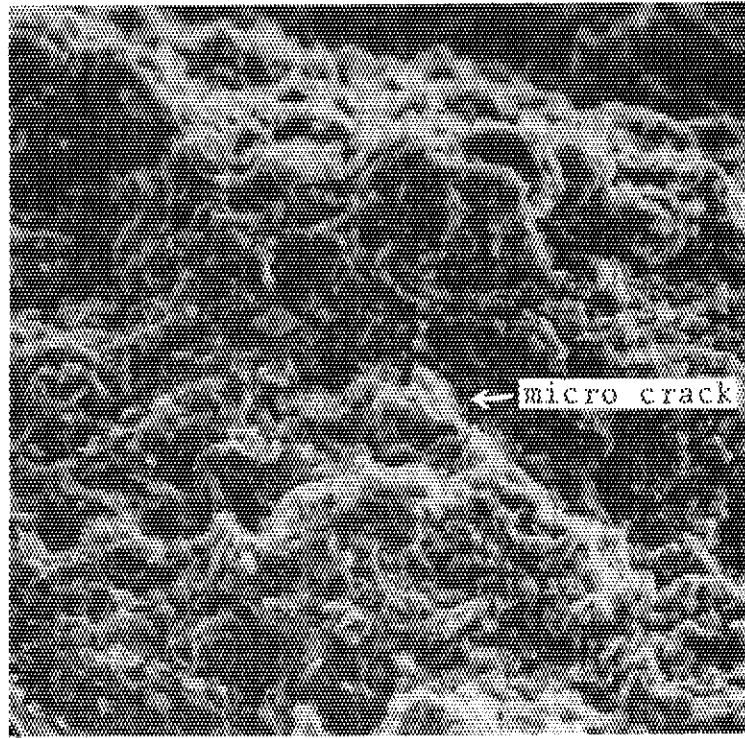
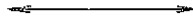


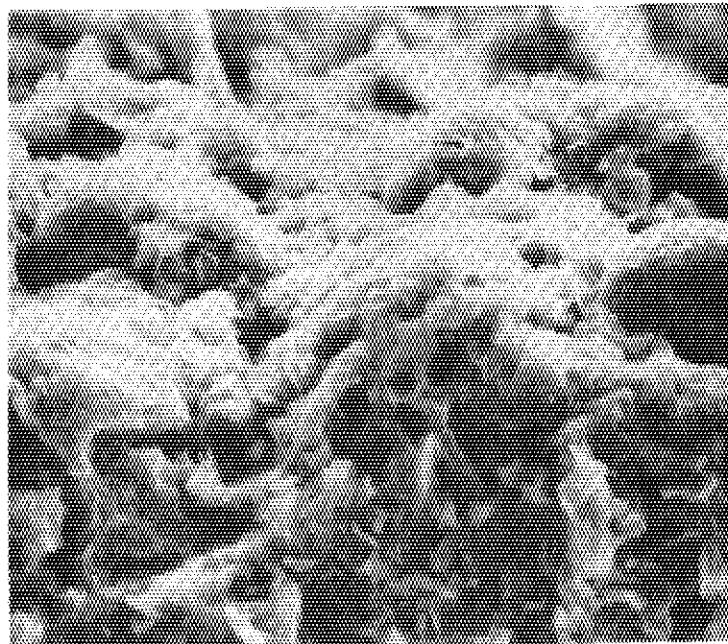
Fig. 27 Scanning electron micrograph of fracture surface

longitudinal direction



(a)

30µm



(b)

10µm

Fig. 28 Scanning electron micrographs of fracture surface