

# エルボでの模擬冷却材漏洩試験

(研究報告)

2004年3月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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。

〒319-1184 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  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division ,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-50 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2004

## エルボでの模擬冷却材漏洩試験

兪 淵植<sup>1</sup> 金子 友好<sup>2</sup>

### 要 旨

プラントの安全設計に影響を与える LBB 概念において、漏洩量評価はその適用性を左右する重要な評価項目である。高速炉のように低圧条件下で運転される機器において漏洩量評価をより正確に行うためには、き裂貫通前後での疲労履歴によるき裂進展挙動及び破面の影響などを考慮する必要がある。

一方、従来の漏洩量評価法ではエルボから漏洩については、直管に置き換えて評価しているのが通常である。横腹き裂を有するエルボを LBB 評価の適用対象にすることを考えると、実際のエルボにおける漏洩挙動を把握しておくことが望ましい。

そこで、本研究では疲労き裂を有するエルボを用いて模擬冷却材漏洩試験を実施し、その結果から従来の漏洩量評価法の妥当性を検討した。

---

<sup>1</sup> 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

<sup>2</sup> 東興機械工業株式会社

## Modeling Coolant Leakage Test of Elbow

Yeon-Sik Yoo<sup>1</sup> Tomoyoshi Kaneko<sup>2</sup>

### Abstract

On the LBB concept which affects on structural safety design, leakage evaluation has been an important category controlling its applicability. In order to evaluate leakage correctly in structures under low pressure such as FBR, it is necessary to consider the effect of crack growth behavior, crack surface and so on which depend on fatigue histories before and after crack penetration.

Meanwhile, in the present leakage evaluation method, generally elbows are modeled as straight pipes for simplicity. Considering that crown crack in elbow will need to be assessed in future, it is useful to comprehend the LBB behavior of elbow.

Therefore, through performing coolant leakage tests of elbows with a fatigue crack, appropriateness of the present leakage evaluation method was investigated in this study.

---

<sup>1</sup> Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center

<sup>2</sup> Tohko Machine Industry Corporation

目次

1. はじめに	1
2. 試験装置の概略	2
3. 試験体の仕様及び応力解析	3
4. 試験内容	4
5. 漏洩量の評価法	5
6. 試験結果及び考察	
6.1 疲労破面	7
6.2 貫通後のき裂の大きさと漏洩量との関係	7
6.3 き裂の大きさによる剛性変化	8
7. おわりに	9
8. 謝辞	10
参考文献	11

表目録

表 1. SUS304 の機械的物性値（室温）	12
表 2. 試験体の形式及び初期欠陥の寸法	13

図目録

図 1. 冷却材模擬試験装置の構成図	14
図 2. エルボ試験体の外観寸法	15
図 3. Sch10s の試験体で最大変位が 13.4mm に対する応力解析結果 (Von Mises 相当応力)	16
図 4. 試験体内外面での対称面角度に対する応力分布	
(a) Sch.10s 試験体における周方向応力分布	17
(b) Sch.10s 試験体における軸方向応力分布	18
(c) Sch.40 試験体における周方向応力分布	19
(d) Sch.40 試験体における軸方向応力分布	20
図 5. 試験体の取り付け図	21
図 6. 疲労破面の写真	
(a) E1	22
(b) E2	22
(c) E3	23
図 7. 漏洩量とき裂大きさとの関係 (内圧 0.75MPa)	
(a) E1	24
(b) E2	25
(c) E3	26
図 8. 鋼性とき裂大きさとの関係	
(a) E1	27
(b) E2, E3	28

## 1. はじめに

冷却材漏洩評価は、プラントの安全設計に影響を与える LBB 概念の成立を左右する重要な評価項目の一つである。高速炉の場合、定常運転時の内圧が低いため、正確な漏洩量評価が必要である。高速炉における漏洩検出器が通常 100g/h の検出性能を持っていることも、より正確な漏洩量評価を求める必要性に直ちに繋がる。このように微小漏れの評価を要求する高速炉での漏洩量評価のためには、漏洩経路になるき裂面での疲労履歴によるき裂進展・貫通挙動及び破面状態などを考慮する必要がある。

一方、漏洩量評価において従来から重要視されたのがき裂開口挙動であり、既に多くの研究例がある[例えば、1-2]。しかし、高速炉の設計概念からなる大型構造物に適用可能な研究は少なく[3-5]、その全ては直管に限れているのが現状である。構造物での健全性評価においてエルボは最も変形能力を要求される箇所である。将来、エルボを欠陥評価の適用対象として扱うことを考えると、LBB の観点からエルボにおける漏洩挙動を把握しておくことが望ましい。

このような趣旨から、本研究では疲労破面を有するエルボを用いて冷却材模擬漏洩試験を実施し、試験と評価の結果に対する比較を行うことにより、従来の漏洩量評価法の妥当性を検討した。

## 2. 試験装置の概略

H15年1月に試験体の移動作業、試験体の準備作業、エルボ試験用ジグのセッティング作業、試験体取り付け作業及び試験装置とパソコンとの連結作業などを行った。冷却材模擬試験装置の構成図を図1に示す[6]。試験時の荷重-変位曲線を求めるために、装置からの電圧信号はスキャナを通しデータ収録装置であるデータローガから読み取れる方式とした。試験装置の仕様を以下にまとめる[6]。

・装置取り付け定盤	幅 1800×長さ 6400×高さ 800
・荷重計	測定範囲       ±20ton/±10V 許容測定誤差   ±0.1%以下
・変位計	測定範囲       ±50mm/±10V 検出分解能     0.01mm 以下 許容応答速度   200mm/sec 以下
・荷重負荷部	ローラあるいはピン固定式
・支持架台	150×75/100×50 薄型鋼製
・油圧装置	最大圧力       20MPa 最大流量       73l/min
・油圧コントロール	正弦波、ランダム波、三角波
・コンプレッサ	最大圧力       1MPa 最大流量       1l/min
・エアータンク	最大圧力       1MPa 内容積         1000 l/min
・加圧タンク A	最大圧力       1MPa 内容積         600 l
・加圧タンク B	最大圧力       1MPa 内容積         2 l
・計測部	データローガ   UCAM-20PC 20ch PCIバス         PCI-3521 12bit

エルボの試験において、疲労時の定格荷重は初期の試験体に変位制御型の荷重を加えて適切に定めることとした。

### 3. 試験体の仕様及び応力解析

試験体は SUS304 のエルボであり、SUS304 の室温での機械的物性値を表 1 に示す。一定圧力下での模擬漏洩試験のため、試験体には試験装置へのつかみ部 2ヶ所にノズルを設けた。試験体の外観寸法を図 2 に示す[6]。初期欠陥は、有限要素法による応力解析に基づいてエルボの横腹の中心から内曲面への 15° 入った外表面（図 2 の欠陥部）に軸方向の未貫通欠陥とした。また、負荷条件となる繰り返しの最大変位と応力との関係も有限要素解析により求めた。解析ツールとしては FINAS [7] を使用しており、シェル要素を用いて対称条件から 1/4 モデルを構成した。解析結果の一例として、図 3 に最大変位 13.4mm を設定した場合 Sch.10s の試験体の横腹に生じる Von Mises 相当応力結果を示す。図 3 の結果により、図 2 に示した初期欠陥の製作位置が適切であることがわかる。

このような解析結果に基づいて、試験体の対称面角度（図 2 参考）に対する内外面での周方向及び軸方向応力分布を求めたのが図 4 である。図 4 の結果から、次のことがいえる：

- ・ 同一の変位に対し、Sch.40 試験体が Sch.10s 試験体に比べ厚肉であるため、やや大きめの応力が算出される。
- ・ 周方向応力は軸方向応力よりやや大きいため、軸方向き裂が通常変位制御を受けるエルボの横腹に発生する初期欠陥として妥当である。
- ・ 内外面での周方向応力はほぼ完全な対称になっていることから、軸方向き裂を有するエルボの横腹は面内曲げ応力に支配される。

試験体の仕様及び上記の有限要素解析により決められた変位制御型の負荷条件を表 2 にまとめる。なお、試験体の装置への取り付け様相を図 5 に示す[6]。

#### 4. 試験内容

き裂進展における疲労履歴が漏洩量評価に及ぼす影響を調べるために、初期欠陥から繰り返し荷重を加えき裂を進展させた。負荷条件は、表2のように片振り及び両振りの変位制御型とし、室温で試験を実施した。貫通までのき裂進展挙動を把握するため、定格荷重の約50%の大きさを持つ繰り返し荷重によりピーチマークを作製した。初期欠陥が外部にあることから先に外部に引張応力がかかるようにし、引張側の最大変位を13.4mmとした。冷却材の漏洩時を貫通とし、その後一定内圧下での漏洩量と進展したき裂の大きさとの関係を調べた。き裂貫通後の漏洩量測定においては、試験体の内圧条件を0.75MPaとし、模擬冷却材としては工業用水を使用した。また、試験時の荷重—変位曲線を求め、き裂の大きさによる試験体鋼性の変化を測定した。

## 5. 漏洩量の評価法

冷却材の漏洩量  $Q$  は通常次式により求められる。

$$Q = \rho \cdot A \cdot V \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は冷却材の密度、 $A$  は次式で定められるき裂開口面積である。

$$A = \pi \cdot C \cdot \delta \quad (2)$$

ここで、 $C$  はき裂半長、 $\delta$  はき裂開口変位である。き裂開口変位に関しては多くの研究例があるが、FBR のような大型構造物に適用可能な理論解は少ないのが現状である[3-5]。

一方、上式(1)の  $V$  は通常次式で定められる漏洩速度である[8]。

$$V = \sqrt{\frac{2p}{\rho \left\{ 1.5 + \frac{f_F (1 + r k_C + (1-r) k_B) l}{D_h} \right\}}} \quad (3)$$

ここで、 $p$  は内圧、 $k_C$  及び  $k_B$  は主に膜及び曲げ応力による抵抗補正係数である。また、 $f_F$  は冷却材の動粘性及び速度に係わる摩擦係数で、次式により定められる。

$$\begin{aligned} f_F &= 96 / Re & Re \leq 2000 \\ f_F &= 0.508 Re^{-0.3} & Re > 2000 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $Re$  は Reynolds 数、 $D_h$  はき裂断面の等価直径で、次式により定められる。

$$Re = \frac{D_h V}{\mu} \quad (5)$$

$$D_h = \frac{\pi / 2}{\sqrt{1 + 1.464 (\delta / 2c)^{1.65}}} \delta \quad (6)$$

ここで、 $\mu$ は冷却材の動粘性係数である。

一方、上式（3）の  $r$  は次式で定められる膜曲げ応力比である。

$$r = \frac{\sigma_m}{\sigma_m + \sigma_b} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_m$  及び  $\sigma_b$  は膜及び曲げ応力成分である。

膜応力主体の構造物に対しては、上式（3）で  $k_C$  のみ用いられ、そのとき  $r=1$  が、また曲げ応力主体の場合は  $k_B$  のみで、そのとき  $r=0$  が考えられる。

## 6. 試験結果及び考察

### 6.1 疲労破面

疲労破面の写真を図6に示す。図6から、ビーチマークによって繰り返し荷重を受けるき裂が半楕円形に進展していることがわかる。なお、エルボでの周方向応力は図4に示したように板曲げ成分として働いていることから、初期欠陥自ら完全に肉厚を貫通することなく、反対側からの出迎えき裂が発生し、疲労き裂が肉厚の6~7割の地点でき裂が貫通挙動を示していることが認められる。

### 6.2 貫通後のき裂の大きさと漏洩量との関係

き裂が肉厚を貫通した後、一定内圧のもとで冷却材の漏洩量を測定し、き裂の大きさ(き裂半長  $C$ )との関係を調べた。その結果を図7に示す。なお、図中の計算値は上述の理論に従ったものであり、エルボでのき裂開口変位は評価式がないため、平板モデルに置き換えて評価した[1]。いずれの場合も、実験による測定値が計算値より小さく評価された。特に、比較的厚肉である E3 においては、漏洩量が少ない領域での誤差が大きく評価された。このような実験と計算の差については以下の原因が考えられる：

- ・ 疲労履歴による破面の抵抗が適切に考慮されていない。
- ・ き裂開口挙動を平板モデルで評価している。
- ・ 実験からの測定誤差

図7の結果は、低圧条件下で微小の漏洩検知を目的とする FBR において、現行の漏洩量評価法が漏洩量を過大に評価する恐れがあることとなり、今後漏洩量評価の見直しが必要であると考えられる。上記に記述した誤差の原因のうち、最も改善が必要である項目は破面の抵抗を適切に考慮することである。一つの案としては、膜及び曲げ応力支配の抵抗補正係数  $k_C$  及び  $k_B$  を、各々の応力によるき裂開口挙動の関数として考えることである[9]。この案は、構造物の形状によって膜と曲げ応力のき裂開口に及ぼす影響度が異なることに着目したものである。今後、弾塑性レベルの応力条件を考慮した構造物試験を通じ、漏洩量評価に及ぼす疲労破面の影響に関する研究を期待する。

### 6.3 き裂の大きさによる剛性変化

試験体において荷重－変位曲線から得た剛性とき裂大きさとの関係を図 8 に示す。 図中の  $D$  は管の平均直径を表す。 図 8 の結果から、き裂が大きくなるにつれて試験体の剛性が小さくなることがわかる。 本試験では  $C/D$ （き裂半長/配管直径）が 0.74 のとき試験終了となっており、その後試験最大変位の 2 倍にあたる強制変位を加え、管の断面を扁平化させた。 断面扁平は、通常座屈の前段階と認識されており、そのときの試験体剛性を測定したところ、図 8 に示したように約 0.86 となった。これは、構造物においてき裂の進展に伴う耐荷能力の低下はもちろん、本来円形であった断面形状が変化することによっても構造物の耐荷能力が低下することを意味する。一方、E2 では E1 と似たような結果を、E3 では E1 と E2 に比べ厚肉であるから剛性が大きく算出された。

## 7. おわりに

室温での疲労履歴を有する試験体を用いて冷却材模擬漏洩試験を実施し、一定内圧下での漏洩量評価を行った。その結果、現行の漏洩量評価法のエルボき裂への適用性に関して有意な知見が得られた。本試験は、今後漏洩量評価に関する研究の方向性に繋がると考えられる。

## 8. 謝辞

冷却材模擬漏洩試験装置の試験実施にあたり、大洗工学センター要素技術  
部開発グループの関係各位に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] H. Tada, P. C. Paris, and G. R. Irwin, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Second Edition (1985).
- [2] A. Zahoor, *Ductile Fracture Handbook 3*. Novetech Corporation and Electric Power Research Institute (1989).
- [3] C. C. France, D. Green, J. K. Sharples, T. C. Chivers, “New Stress Intensity Factors and Crack Opening Area Solutions for Through-wall Cracks in Pipes and Cylinders”, *ASME PVP 1997*. Vol.350. pp.143-195 (1997).
- [4] H. Machida, Y. S. Yoo, “Crack Opening Displacement of a Crack in a Plate Subjected to Bending Load”, *SMiRT-17, G10-3* (2003).
- [5] Y. S. Yoo, “Crack Opening Displacement of Circumferential Through-wall Cracked Cylinders Subjected to Tension and In-plane Bending Loads”, *JNC TN9400 2002-079* (2003).
- [6] 冷却材漏洩試験装置の設置・製作 作業報告書、平成 11 年 5 月、新型炉技術開発株式会社
- [7] *FINAS Ver.13 使用説明書*、PNC (1995).
- [8] 平成 12 年度 発電用新型炉技術確証試験 調査報告書 別冊 高温構造健全性評価指針(案)、平成 13 年 3 月、電力中央研究所
- [9] Y. S. Yoo, “Effect of Membrane and Through-wall Bending Stresses on Fatigue Crack Growth Behavior and Coolant Leakage Velocity”, *JNC TN9400 2003-095* (2003).

表 1. SUS304 の機械的物性値 (室温)

E(GPa)	$\nu$	$\sigma_Y$ (MPa)
194	0.266	205

E : ヤング率

 $\nu$  : ポアソン比 $\sigma_Y$  : 降伏応力

表 2. 試験体の形式及び初期欠陥の寸法

試験体	形式	t(mm)	w(mm)	L(mm)	d(mm)	負荷条件(mm)
E1	Sch.10s	3.4	0.3	3.4	0.68	最大変位 13.4 最小変位 1.34
E2	Sch.10s	3.4	0.3	3.4	0.68	最大変位 13.4 最小変位 13.4
E3	Sch.40	7.1	0.3	7.1	1.42	最大変位 13.4 最小変位 1.34

t : 肉厚

w : スリット幅

L : 欠陥長さ

d : 欠陥深さ

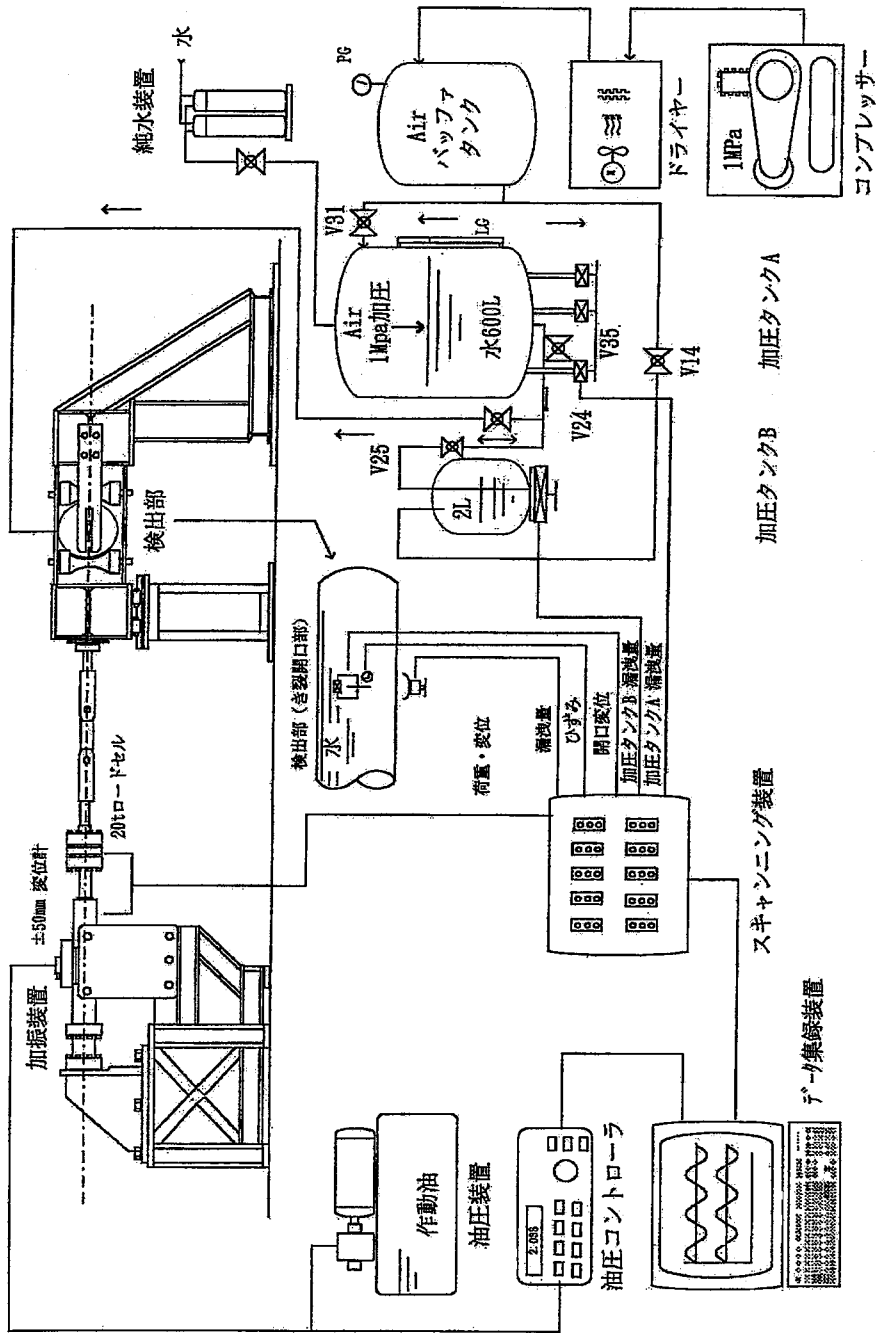


図 1. 冷却材模擬試験装置の構成図

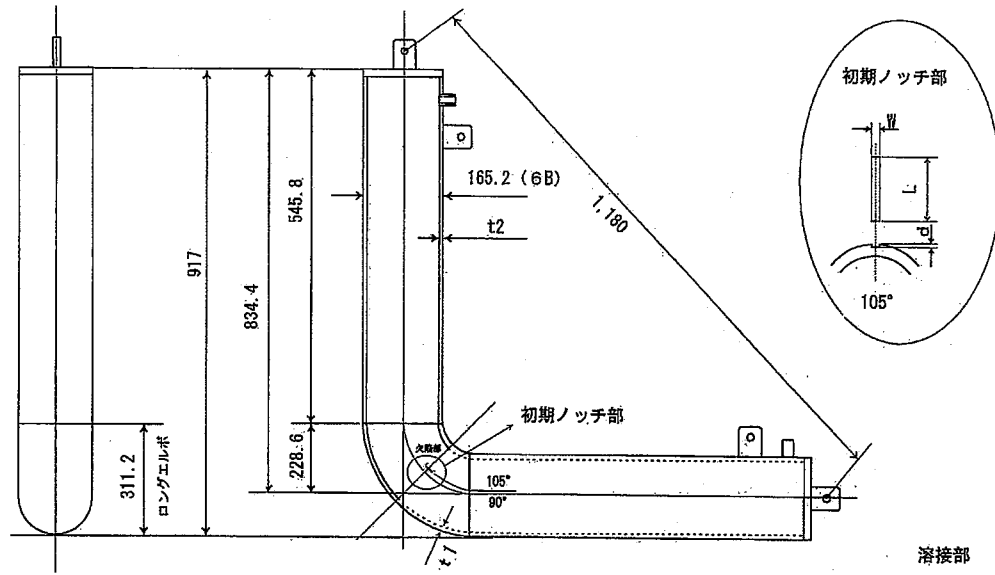


図 2. エルボ試験体の外観寸法

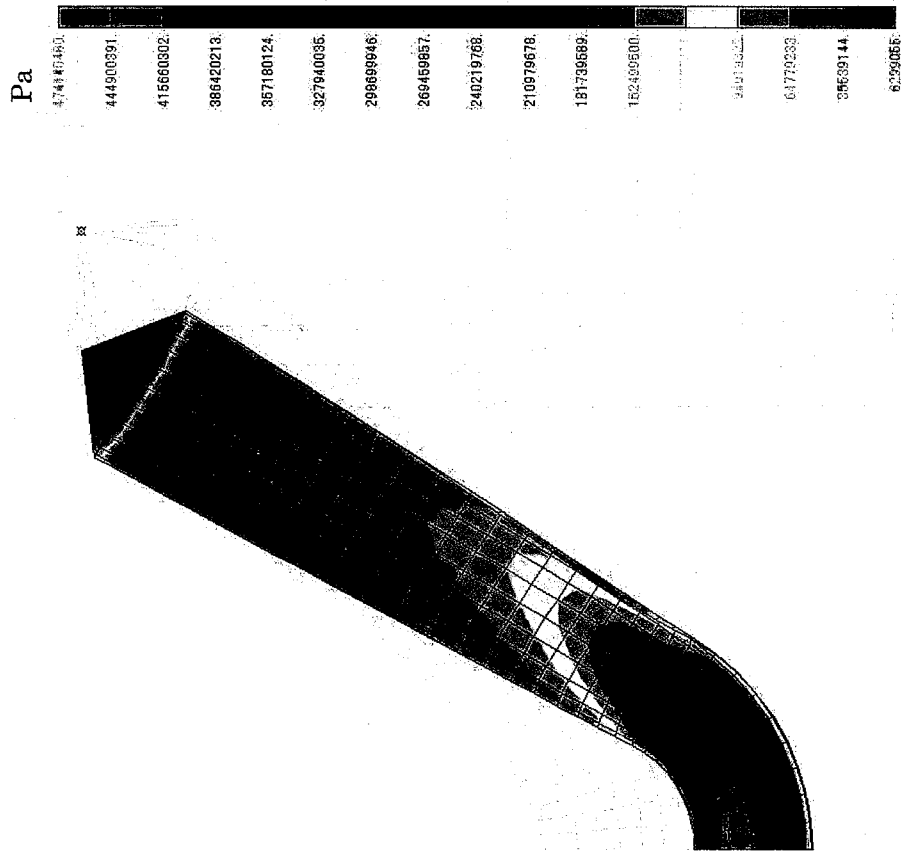
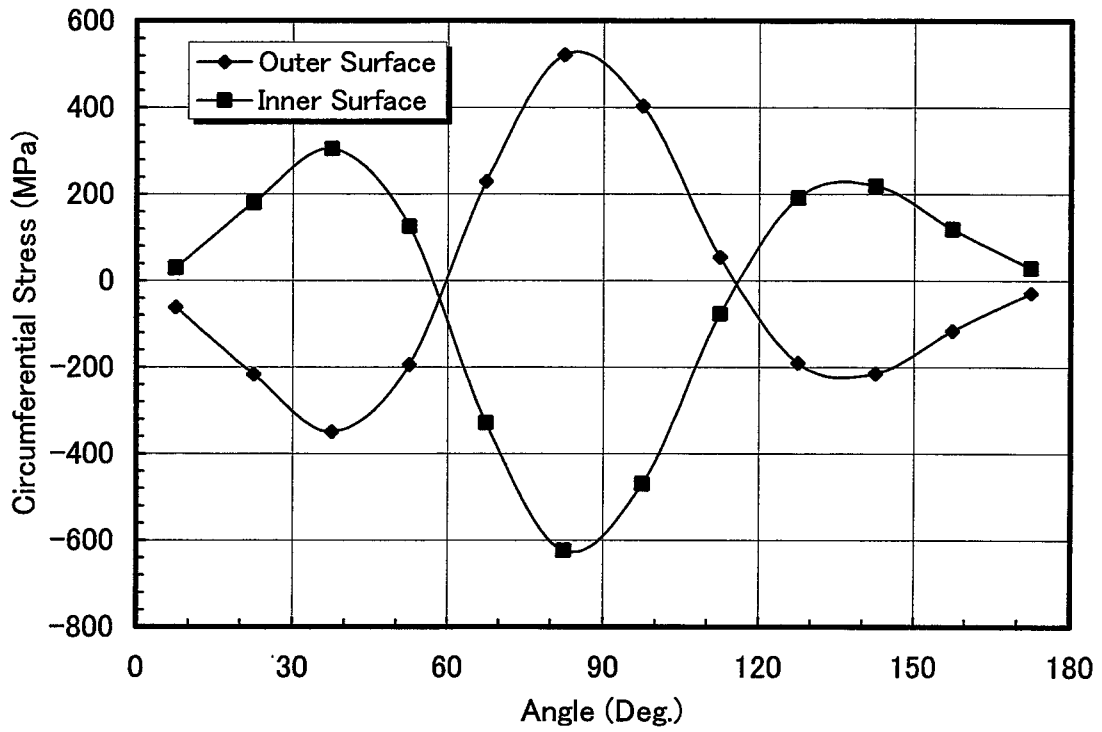
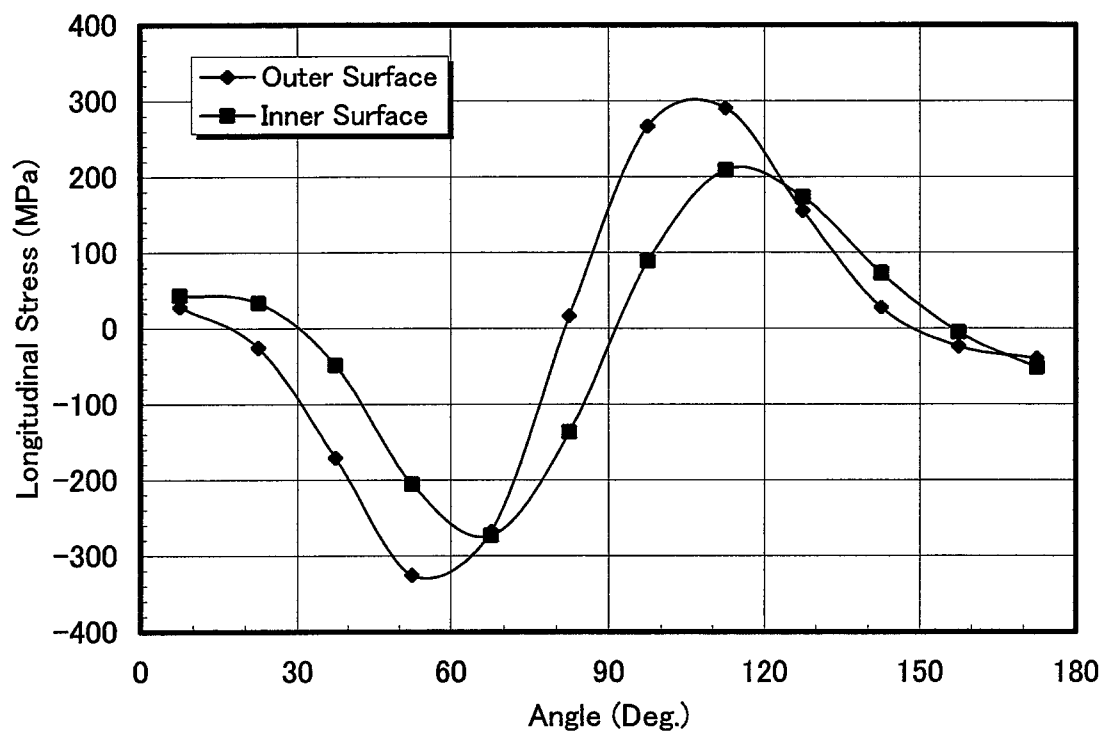


図 3. Sch10s の試験体で最大変位が 13.4mm に対する応力解析結果  
(Von Mises 相当応力)



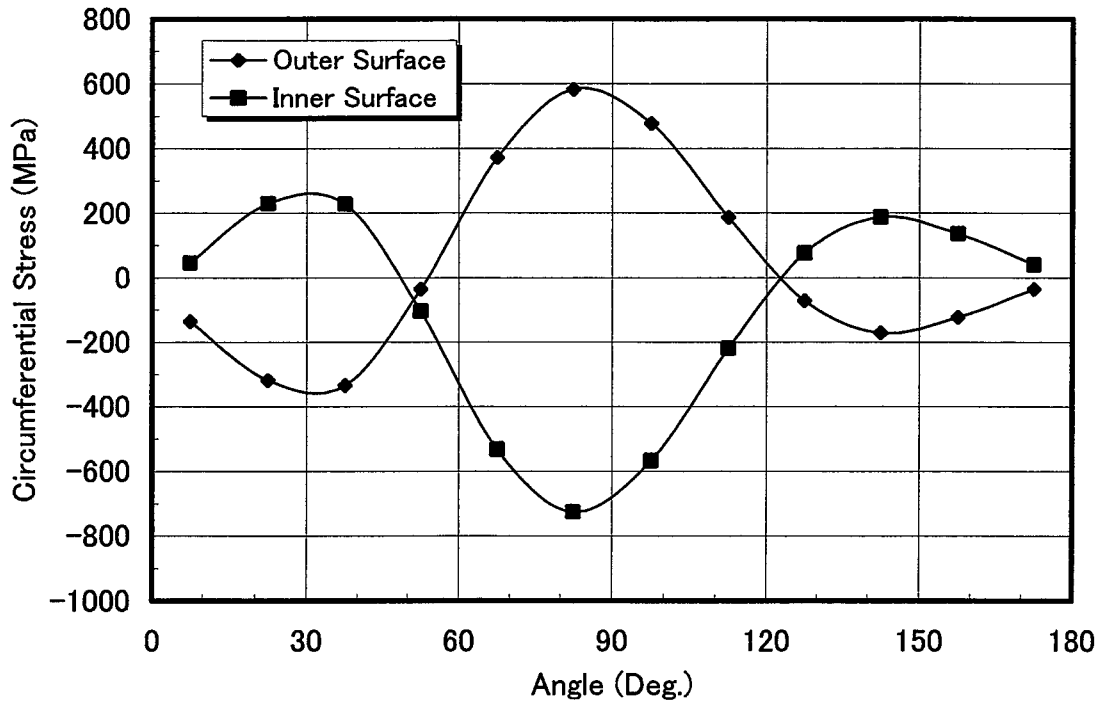
(a) Sch.10s 試験体における周方向応力分布

図 4. 試験体内外面での対称面角度に対する応力分布



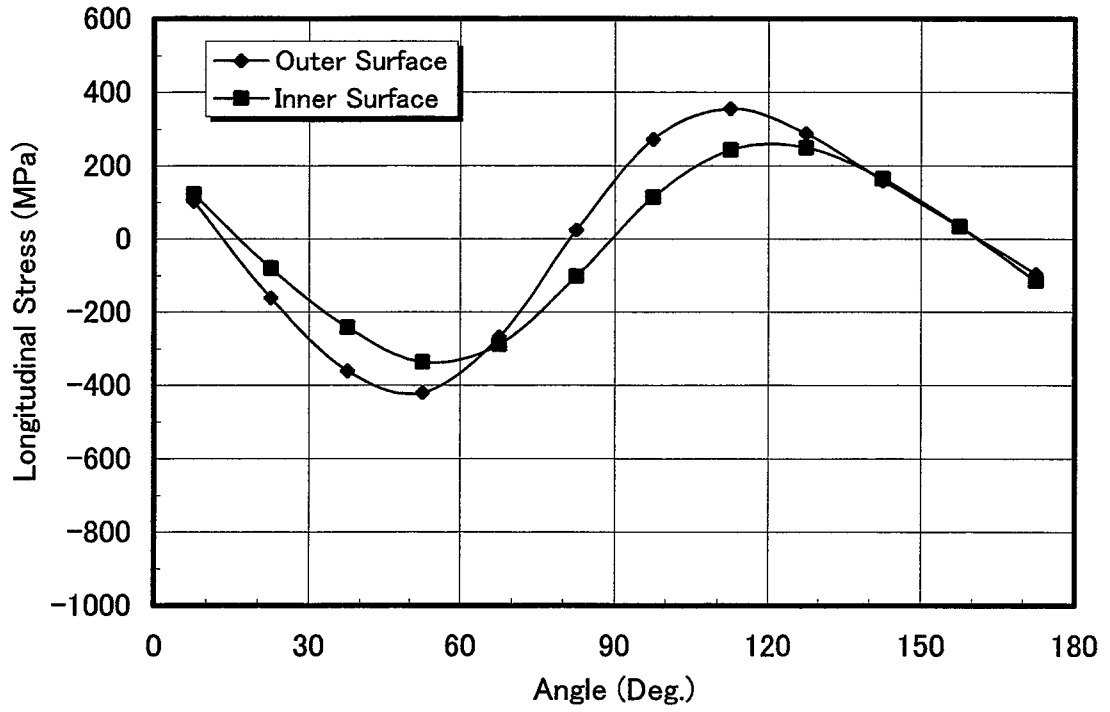
(b) Sch.10s 試験体における軸方向応力分布

図 4 (cont.). 試験体内外面での対称面角度に対する応力分布



(c) Sch.40 試験体における周方向応力分布

図 4 (cont.). 試験体内外面での対称面角度に対する応力分布



(d) Sch.40 試験体における軸方向応力分布

図 4 (cont.). 試験体内外面での対称面角度に対する応力分布

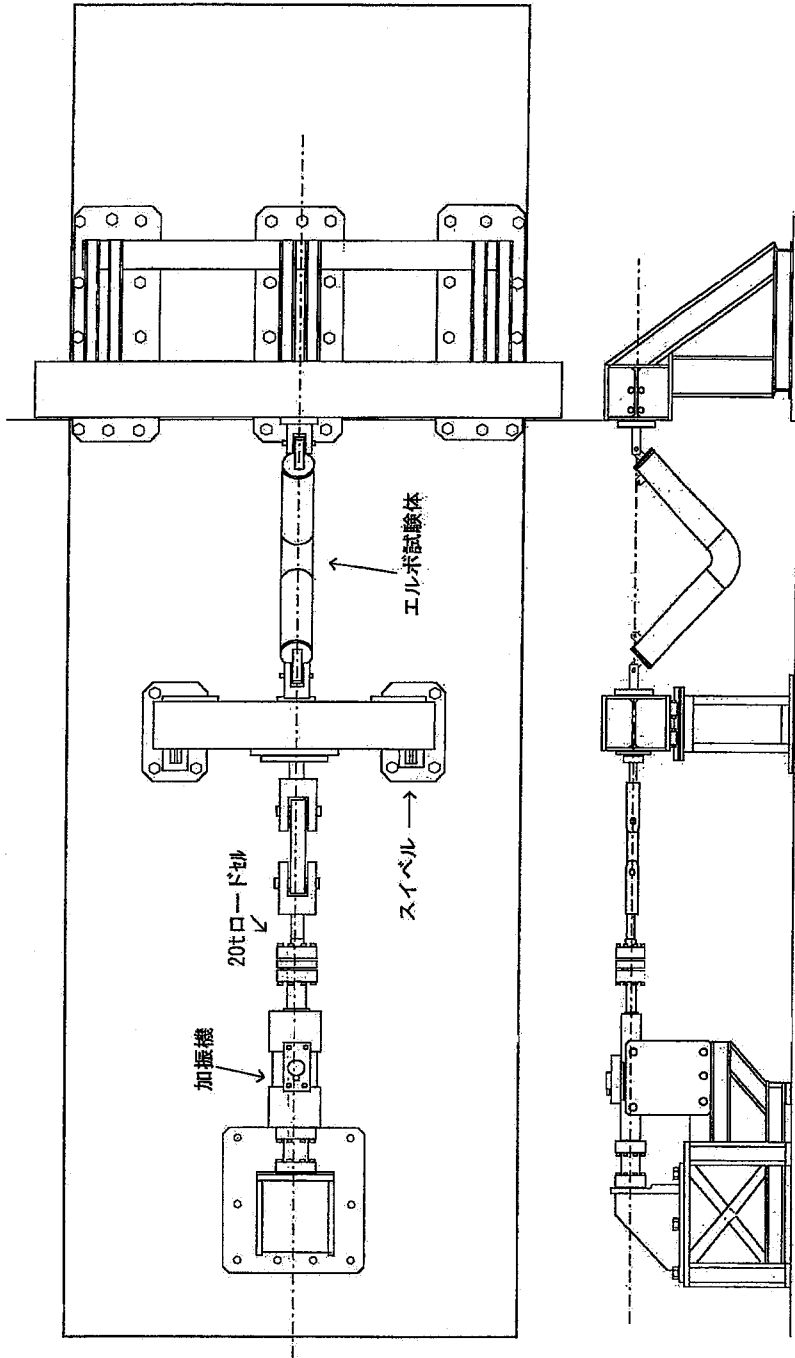
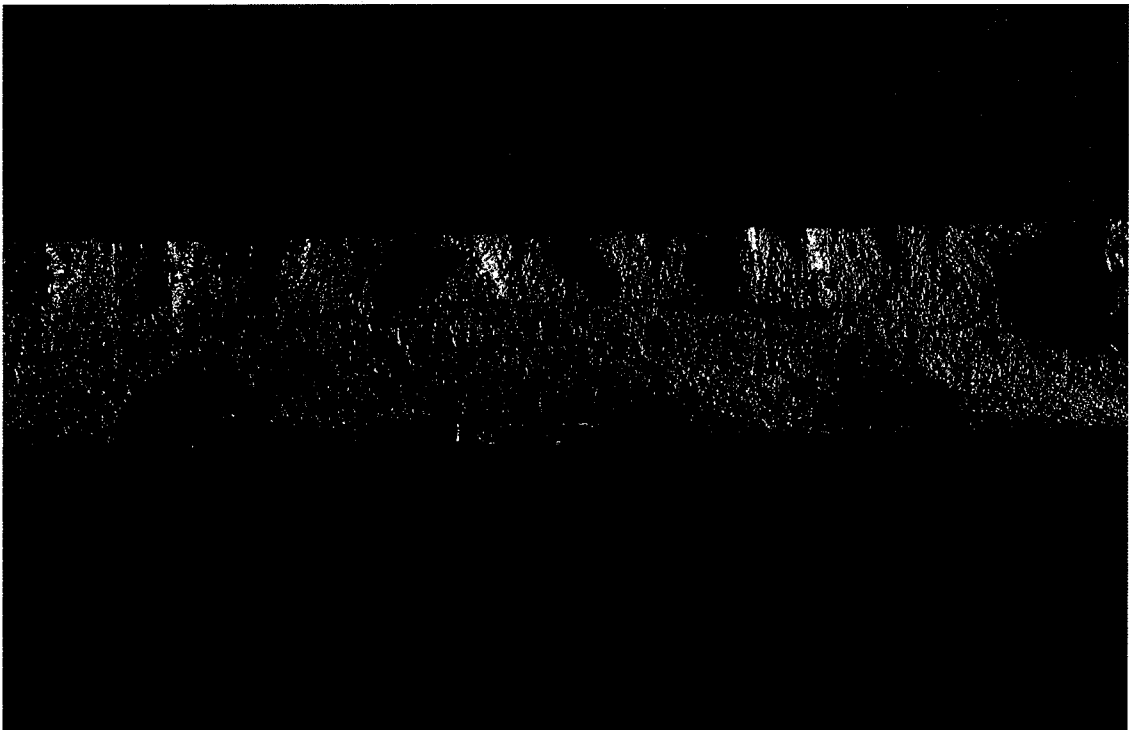


図 5. 試験体の取り付け図

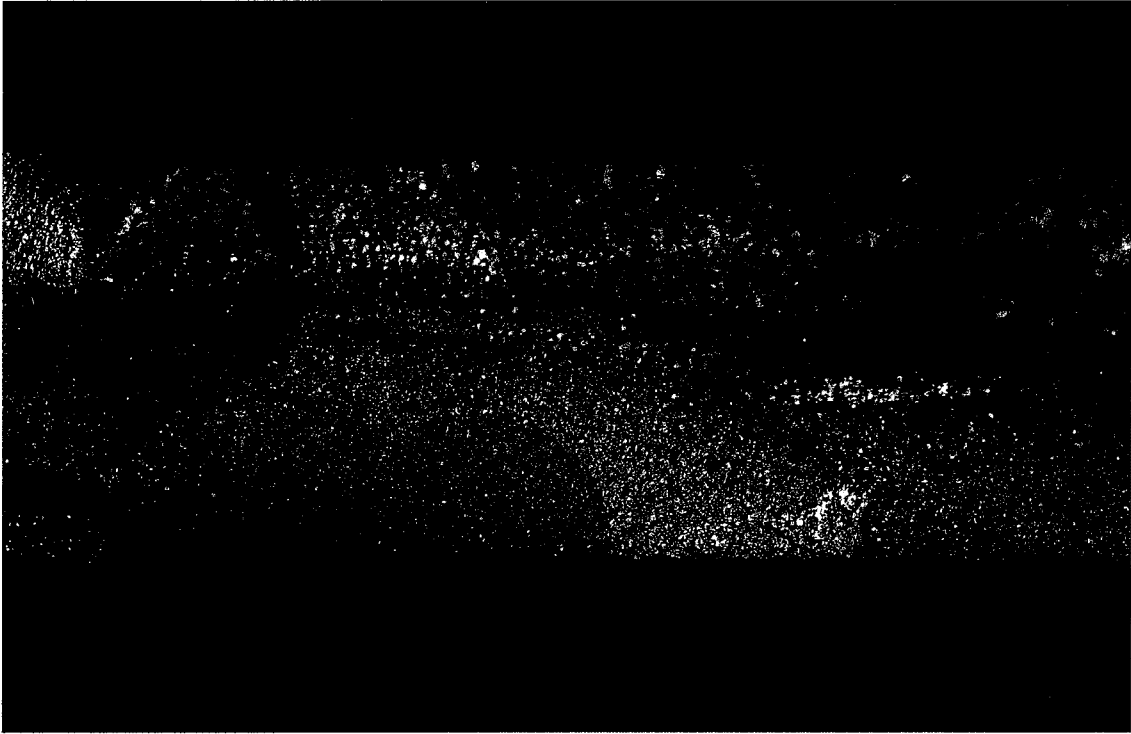


(a) E1



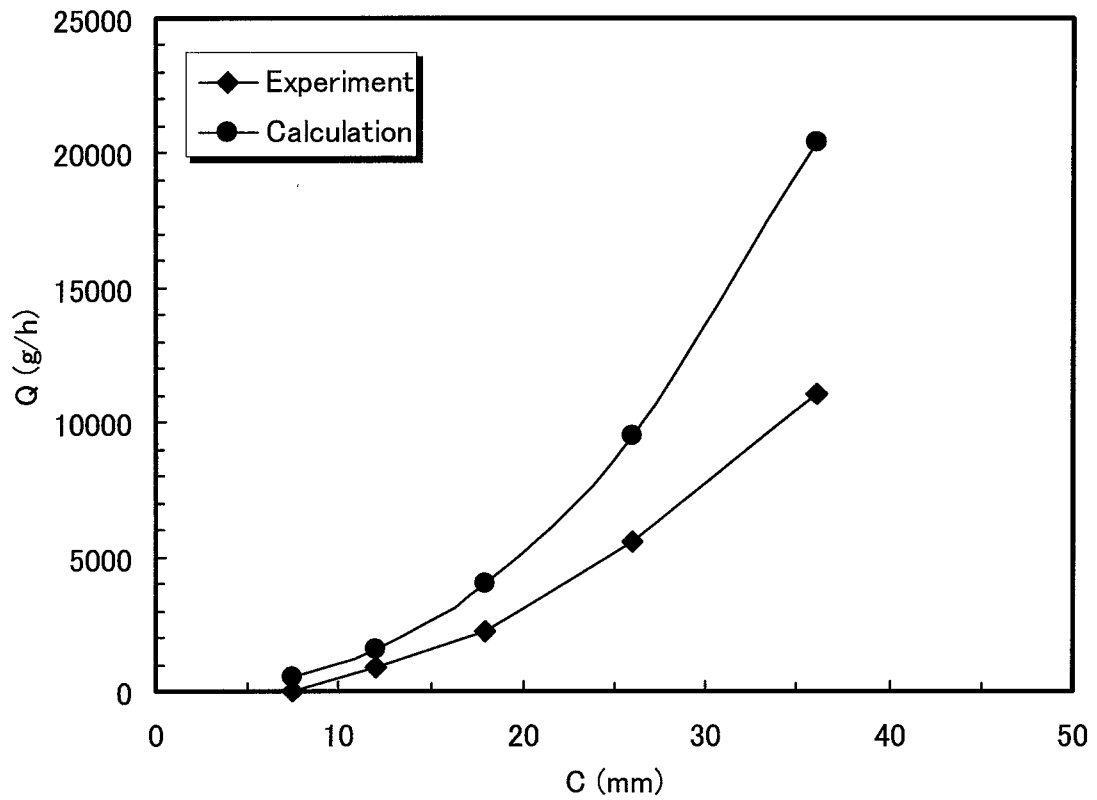
(b) E2

図 6. 疲労破面の写真



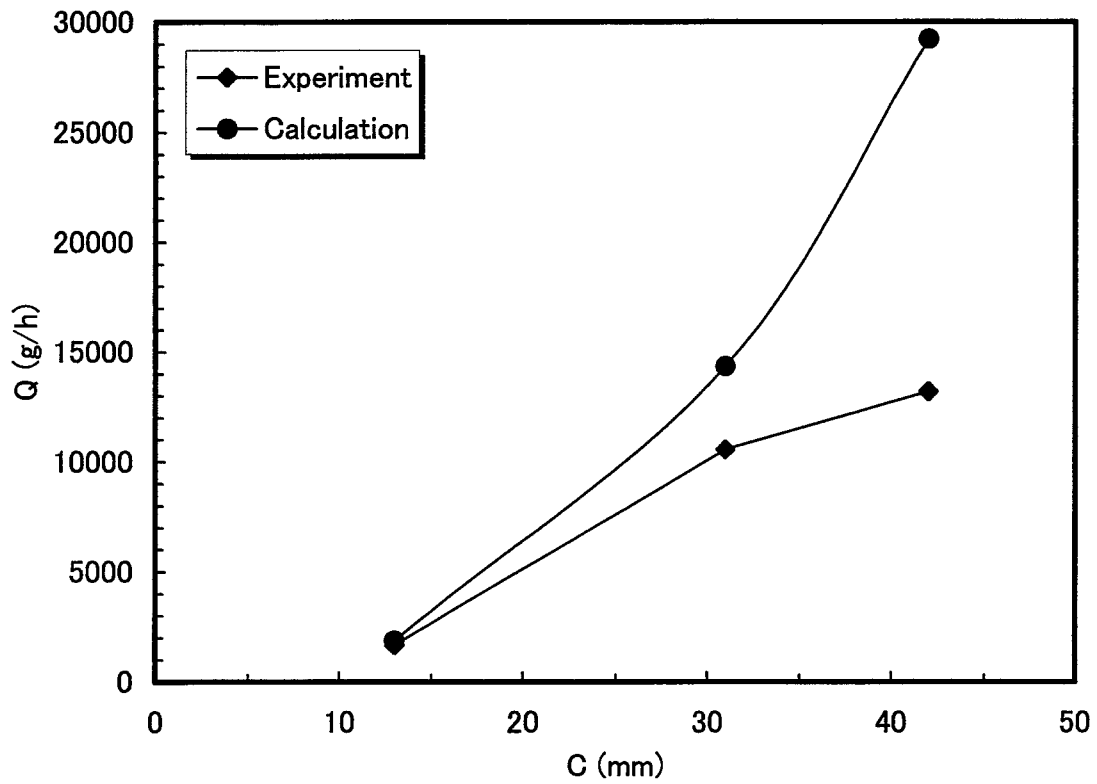
(c) E3

図 6 (cont.). 疲労破面の写真



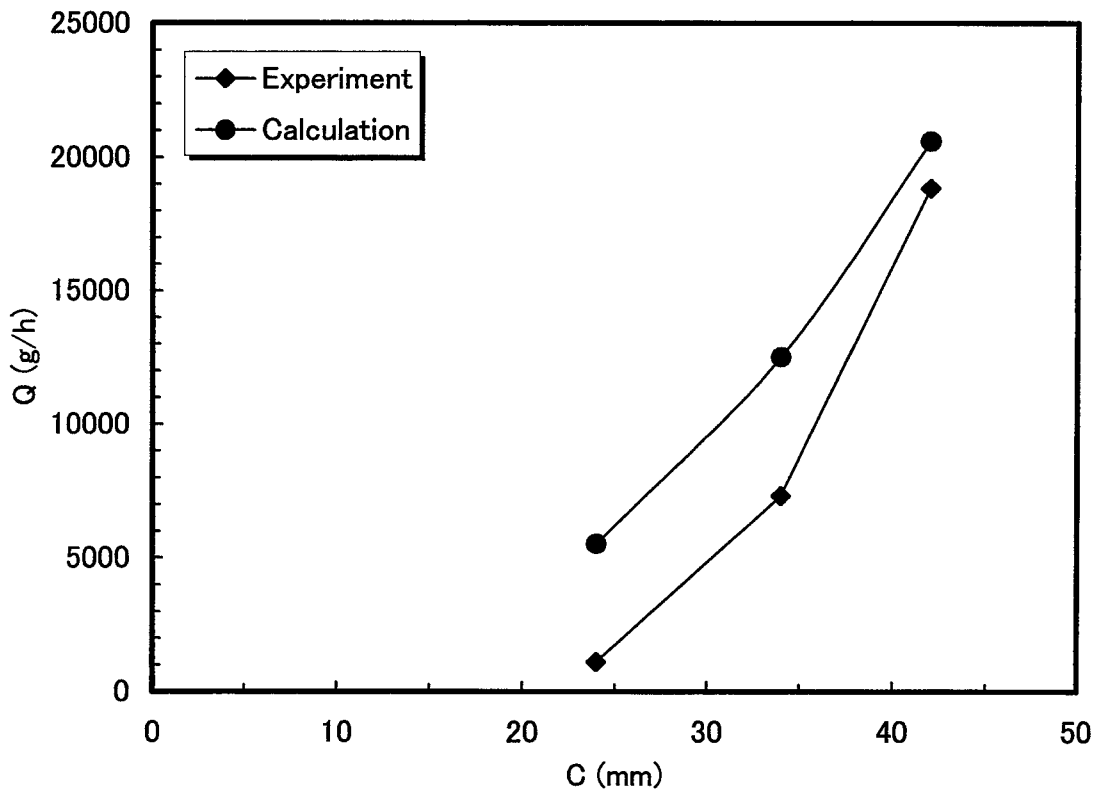
(a) E1

図 7. 漏洩量とき裂大きさとの関係 (内圧 0.75MPa)



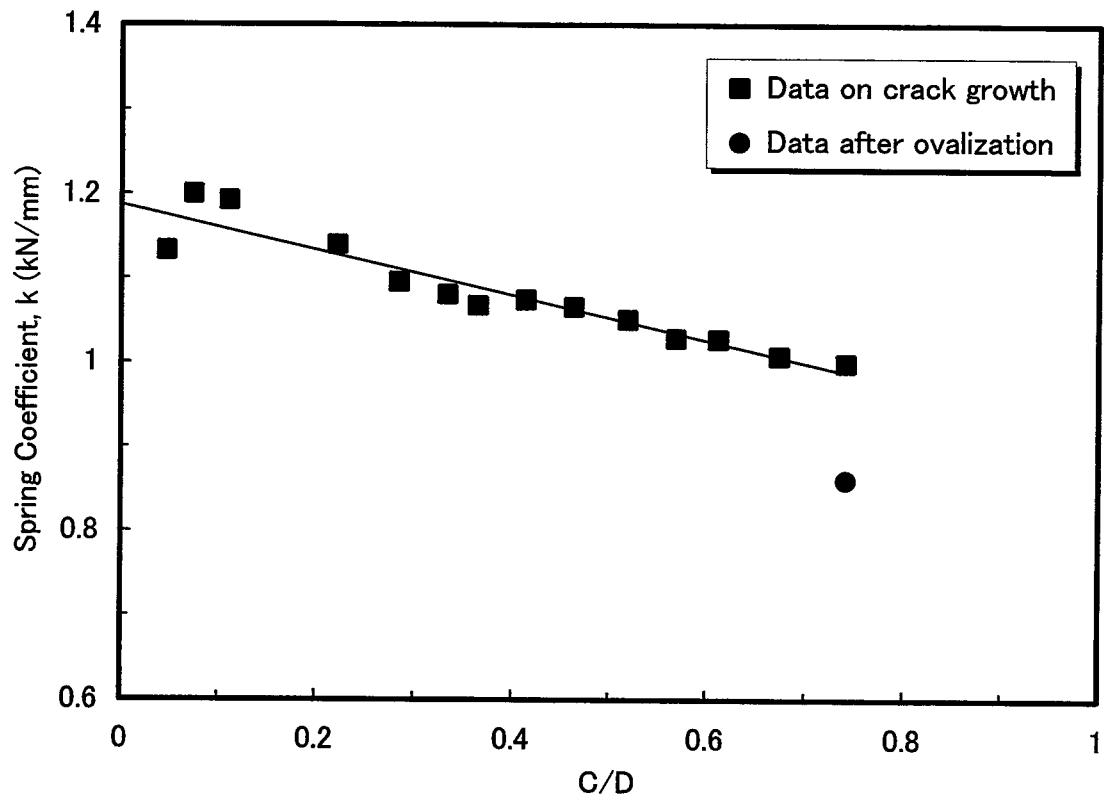
(b) E2

図 7 (cont.). 漏洩量とき裂大きさとの関係 (内圧 0.75MPa)



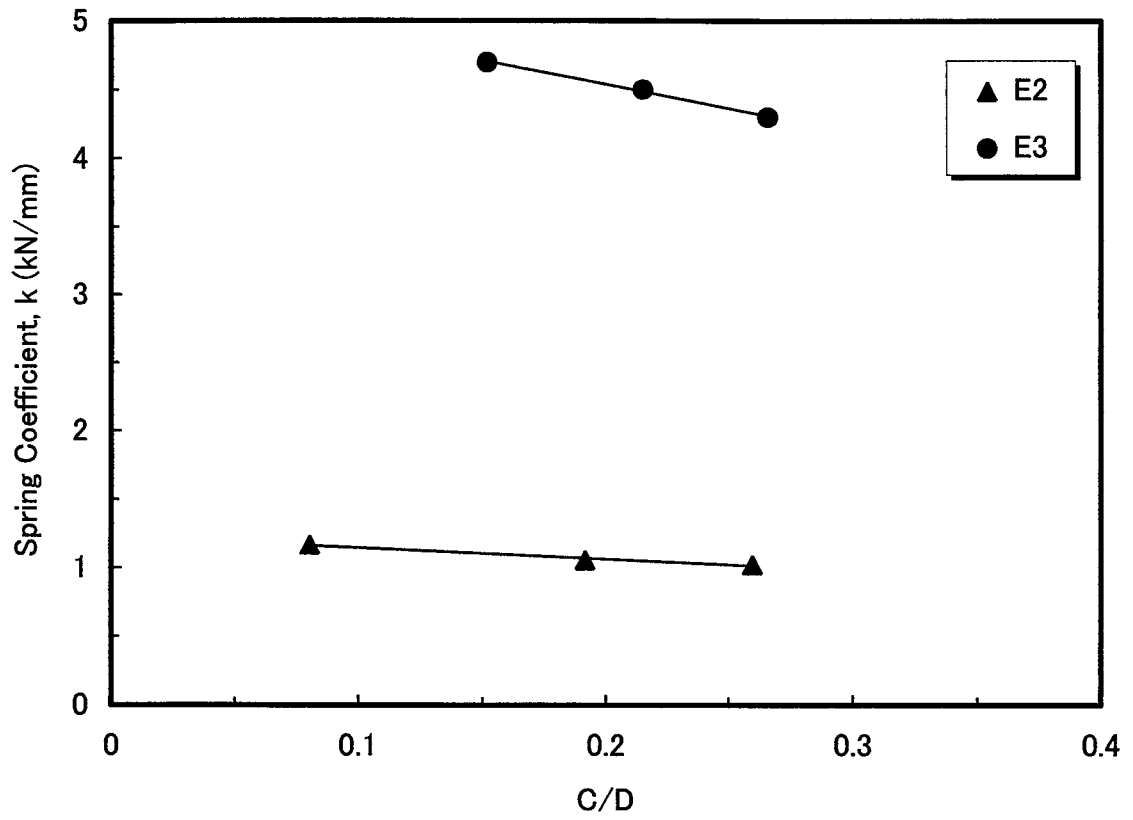
(c) E3

図7 (cont.). 漏洩量とき裂大きさとの関係 (内圧 0.75MPa)



(a) E1

図 8. 剛性とき裂大きさとの関係



(b) E2, E3

図 8 (cont.). 剛性とき裂大きさとの関係