

**分置**

# 高速炉構造材料の高サイクル疲労特性（Ⅱ）

## 316FR 鋼の高温高サイクル疲労試験 [中間報告]

### (研究報告)

2005年5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  
4-49 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)  
2005

## 高速炉構造材料の高サイクル疲労特性（Ⅱ）

### 316FR 鋼の高温高サイクル疲労試験[中間報告]

(研究報告)

小高 進\*、加藤 章一\*、吉田 英一\*、石上 勝夫\*\*

#### 要 旨

高速炉プラントの機器、配管において温度が異なる冷却材の合流部では、高温と低温の流体混合による不規則な温度ゆらぎ（サーマルストライピング）に伴い熱応力が生じ、この熱応力が疲労損傷に影響を与えるとされる有効な繰返し数は、 $10^8 \sim 10^9$ サイクル程度に及ぶとされている。このため、高サイクル領域における疲労損傷機構や疲労寿命の評価を実験的に把握しておくことが重要な課題である。

本研究試験では、高速炉構造用 SUS316(316FR 鋼)を対象に、レーザ変位計を用いたひずみ制御による高サイクル疲労試験を  $550^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$  の条件下で実施した。これまでに得られた中間結果を以下に示す。

- (1) レーザ変位計を用いた新しいひずみ制御方式の疲労試験技術を導入して  $10 \sim 60\text{Hz}$  の周波数で  $550^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$  の高温疲労試験を実施し、これまでに  $10^7$  サイクル域の高サイクル疲労破損データを取得した。
- (2)  $10^7$  サイクル域の高サイクル疲労寿命は、設計用の材料強度基準等(DDS)の最適疲労破損式から単純外挿して求められる曲線と比較して長寿命側になることがわかった。また、材料強度基準等の高度化に関する作業(KOM-MSS WG)で検討された高サイクル疲労破損式との比較評価においても、十分保守側となる結果であった。
- (3) 周波数が  $0.1\text{Hz}$  から約  $60\text{Hz}$  までの範囲内では、疲労寿命に及ぼす周波数の有意な影響は認められなかった。また、高サイクル疲労寿命の温度依存性が認められた。
- (4)  $10^7$  サイクル域で疲労破損した試験片では、内部起点型の破面（フィッシュアイ）が認められた。

---

\* 大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験グループ

\*\* 常陽産業株式会社

**High-Cycle Fatigue Properties of Structural Materials for FBR**  
**(II) High-Cycle Fatigue tests of 316FR Steel at Elevated Temperature**  
**[Interim Report]**

Susumu ODAKA\*, Shoichi KATO\*, Eiichi YOSHIDA\*, Katsuo ISHIGAMI\*\*,

**Abstract**

In liquid metal cooled Fast Breeder Reactors (LMFBRs), thermal fluctuation due to fluid mixing induces high-cycle fatigue damages on structural materials. Such a cyclic thermal stress is estimated to repeat approximately from  $10^8$  to  $10^9$  cycles during a plant service period. Therefore, it is essential to investigate the fatigue property in a very-high cycle region. In this study, high-cycle fatigue tests at 550°C, 600°C, and 650°C under strain controled conditions were carried out for the 316FR steel. The following results are obtained until now.

- (1) Adopting experimental techniques using laser level meter, high-cycle fatigue tests were performed at elevated temperature in the repetition frequency of 10-60Hz, and the high cycle fatigue fracture data up to  $10^7$  cycle regions were obtained.
- (2) The number of cycles to failure observed in the high-cycle fatigue tests up to  $10^7$  cycle regions was larger than that calculated from simple extrapolation of average fatigue failure formula given in the material strength standard (DDS) for a design. Moreover, these lives were also conservative in comparison with those estimated from the high-cycle fatigue failure formula given by KOM-MSS WG
- (3) The influence of frequency on fatigue life was not almost significant in the range from 0.1 to 60Hz. In contrast, the influence of temperature on fatigue life was observed.
- (4) The fisheye fracture was observed in the high-cycle fatigue test specimens failed in  $10^7$  cycle regions.

---

\* New Technology Development Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

\*\* Joyo Industry Company

## 目 次

1. 緒言	1
2. 試験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 試験片形状	2
2.3 高サイクル疲労試験	2
(1) 試験装置	2
(2) 疲労試験方法	3
2.4 破面観察	4
3. 試験結果及び検討	5
3.1 高サイクル疲労試験結果	5
(1) 疲労寿命	5
(2) 周波数の影響	6
(3) 試験温度の影響	6
3.2 応力変動	6
3.3 疲労試験後の破面観察結果	7
3.4 高サイクル疲労特性の検討	8
4. 結 言	9
参考文献	10

## 表リスト

表 2.1	供試材の寸法、熱処理条件等	12
表 2.2	供試材の引張、硬さ試験	12
表 2.3	供試材の化学成分	12
表 2.4	高サイクル疲労試験装置の概略仕様	13
表 3.1	高サイクル疲労試験の結果	14

## 図リスト

図 2.1	疲労試験片形状	15
図 2.2	試験片周りの主要構成図	15
図 2.3	試験片周りの主要構成写真	15
図 2.4	高サイクル疲労試験装置の全体構成	16
図 2.5	動作原理	17
図 2.6	試験片の温度測定箇所（標準例）	18
図 3.1	316FR 鋼の疲労寿命特性 (550°C)	19
図 3.2	316FR 鋼の疲労寿命特性 (600°C)	19
図 3.3	316FR 鋼の疲労寿命特性 (650°C)	20
図 3.4	疲労寿命と試験温度の関係	20
図 3.5	繰返しに伴う応力変動	21
図 3.6	繰返しに伴う応力変動（周波数の影響）	21
図 3.7	応力範囲と全ひずみ範囲の関係 (550°C)	22
図 3.8	応力範囲と全ひずみ範囲の関係 (600°C)	22
図 3.9	応力範囲と全ひずみ範囲の関係 (650°C)	23
図 3.10	KOM-MSS における高サイクル疲労破損式との比較 (550°C)	23
図 3.11	KOM-MSS における高サイクル疲労破損式との比較 (600°C)	24
図 3.12	KOM-MSS における高サイクル疲労破損式との比較 (650°C)	24

## 写真リスト

写真 3.1	疲労試験片の外観	25
写真 3.2	疲労試験片の破面観察結果	26

## 付録

付録 1	周波数の切替履歴	28
付録 2	大気中疲労試験データ (316FR 鋼: 母材-受入材)	29
付録 3	SUS304 鋼の高サイクル疲労破損式 ( $>10^6$ サイクル)	31

## 1. 緒 言

原子力プラントの機器、配管における温度が異なる冷却材の合流部では、高温と低温の流体混合による不規則な温度ゆらぎ（サーマルストライピング）が生じるため、繰返し熱応力による高サイクル疲労破損に留意する必要がある。近年では、軽水炉プラントにおける高サイクル疲労に起因した破損事例が複数報告されており<sup>[1-2]</sup>、また高速炉プラントでも配管合流部に破損事例が見つかっている<sup>[3]</sup>。液体金属冷却型高速炉の場合は、冷却材であるナトリウムの熱伝導率が水に比較して約100倍大きいことから、流体中で発生した温度ゆらぎが構造材料表面まで到達し易い特徴がある。さらに、構造材料表面への熱伝達が良いのに対し、構造材料内の熱伝導が小さく表面の熱膨張・収縮が大きくなるため、流体中で発生した不規則な温度変動に伴う繰返し熱応力が発生することになる。熱応力は流体温度のゆらぎに応じて変動し、熱応力が小さくても繰返し数が多くなると高サイクル疲労損傷を引き起こす可能性がある。疲労損傷を引き起こす熱応力の繰返し数は、 $10^8\sim10^9$ サイクル程度に及ぶとされており<sup>[4]</sup>、この高サイクル領域における疲労損傷機構や疲労寿命の評価を実験的に把握しておくことが重要な課題である。

前報<sup>[5]</sup>では、代表的な構造材料であるSUS304について、切欠き効果も含めた荷重制御による高サイクル疲労特性を把握した。引き続き、実用高速炉の構造材料としての高速炉構造用SUS316（以下、316FR鋼）に関する実用高速炉高温構造設計方針（以下、FDS）の高温高サイクル疲労線図の策定や破損機構の検討に必要な高サイクル疲労破損データを取得することを目的とし、核燃料サイクル開発機構で最近開発した「ひずみ制御方式による超高サイクル疲労試験技術<sup>[6]</sup>」を用いて、 $10^7\sim10^9$ サイクル寿命域の高サイクル疲労試験を進めている。本報では、これまでに得られた316FR鋼の $10^7$ サイクル域までの高サイクル疲労特性に関する検討結果を中間報告としてまとめた。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

供試材には、316FR鋼の40mm厚さの圧延材を用いた。供試材の熱処理条件および受入れ時の引張特性等を表2.1と表2.2に、化学成分を表2.3にそれぞれ示す。316FR鋼は、JISに規定されるSUS316の化学成分の範囲内で製造されたものであり、炭素を0.012%と低く抑え、窒素を0.1%と高めに添加調整している。316FR鋼は、実用高速炉の構造材料としての適用が検討されている材料である。

### 2.2 試験片形状

高サイクル疲労試験に使用した試験片の形状を図2.1に示す。試験片の形状は、JIS Z 2279の「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」<sup>[7]</sup>及び「FBR金属材料試験実施要領書（改定版）」<sup>[8]</sup>を参考にし、当試験装置仕様の応力分布、変形量、温度分布等を考慮した寸法とした。試験片は、平行部Φ6mm×L15mm、押当てひずみ計の標点間距離12mmの中実丸棒型であり、軸方向と供試材の圧延方向が平行になるように採取した。また、試験片の平行部は、機械加工キズを除去するために、#600のエメリー紙で軸方向に研磨し、最終表面仕上げを行った。なお、試験片加工後の熱処理は行っていない。

### 2.3 高サイクル疲労試験

#### (1) 試験装置

試験装置の主な仕様を表2.4に、試験片周りの主要構成を図2.2から図2.3に、全体構成を図2.4に示す。本装置の特徴は、従来型である押当て型ひずみ計（以下「押当てひずみ計」）に加えて、試験片の上下チャック部間にレーザ型変位計（以下「レーザ変位計」）を取り付け、これら両者を併用してひずみ制御を行うことである<sup>[6]</sup>。

本装置におけるひずみ制御の動作原理を図2.5に示す。最初は、押当てひずみ計を試験片に設置した状態で、周波数0.1Hzにてレーザ変位計の全ひず

み範囲値を徐々に大きくしていき、押当てひずみ計により計測される全ひずみ範囲値が設定値にほぼ到達した段階の全ひずみ範囲の比を用いて、レーザ変位計の全ひずみ範囲設定値を決定している（以下、この動作を「キャリブレーション」と言う）。この設定値を決定した後、押当てひずみ計を取り外し、レーザ変位計によるひずみ制御で、大きい周波数（図2.5では100Hz）での試験を可能としている。

通常、押当てひずみ計によるひずみ制御の下で疲労試験を行った場合、レーザ変位計の全ひずみ範囲は、繰返し硬化が顕著な初期段階では、繰返しに伴って変動することを予備試験により確認している。そこで、本試験装置では、その現象を考慮し、任意の繰返し数と任意の荷重変化率を設定することにより、全自动でキャリブレーションを実施し、変動を補正する機能を備えている。

## (2) 疲労試験方法

高サイクル疲労試験は、JIS Z 2279の「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」<sup>[7]</sup>、「FBR金属材料試験実施要領書（改訂版）」<sup>[8]</sup>及び「ひずみ制御による高温超高サイクル疲労試験技術」<sup>[6]</sup>に準拠して実施した。試験条件は、全ひずみ範囲を0.3%とし、試験温度は、ナトリウム冷却大型炉の炉容器出口温度の550°Cと、温度依存性を確認するための600°C、650°Cの3温度とした。目標破損繰返し数は10<sup>7</sup>サイクル程度か、それ以上とした。ひずみ制御方式は、平均ひずみ“0”の定ひずみ範囲の軸力による引張圧縮の繰返し制御（正弦波）である。試験雰囲気は大気中である。

試験片の温度測定箇所を図2.6に示す。試験片の加熱には高周波誘導加熱を用い、温度の制御点は従来の低サイクル疲労試験と同様に試験片のR部上部にR型熱電対を点溶接した。なお、試験開始前に、図2.6に示す①～⑦の温度分布確認試験を実施し、設定に対して試験片の平行部の温度分布は、±5°C以内であることを確認している。また、レーザ変位計は試験片チャック部間の変位を測定しているため、チャック部で温度変化が生じた場合、試験片やチャック部の熱膨張・収縮による計測誤差が大きくなる。このため、チャ

ック部に流れる冷却水の温度変動を±1°C以内に恒温水槽を用いて制御した。試験中においては、図2.6に示す④～⑧の温度分布を監視している。

本試験条件において、原則として初期の約2,000サイクルまでは従来の押当てひずみ計を、それ以降は前述の図2.5に示す手法で行った。つまり、到達繰返し数約2,000サイクルまでの制御方法は、試験片の内部発熱防止とひずみ制御の精度を維持するため、従来型の押当てひずみ計を用いて周波数0.1Hzにて実施した。繰返し数約2,000サイクル以降は、図2.6に示す④～⑧の温度を監視しながら、試験片の平行部中央⑧に縛付けにより設置されたR型熱電対が設定温度の±5°C以内となる範囲にて、周波数を段階的に大きくして設定した。破損繰返し数( $N_f$ )は、寿命中期頃に現れる引張側の最大応力から25%低下した時点とした。

## 2.4 破面観察

高サイクル疲労破損後の試験片破面を、走査型共焦点レーザ顕微鏡（型式：OLS1200、オリンパス光学工業株製）を用いて観察した。疲労試験後の試験片は完全破断していないため、き裂の生じてない部分（き裂発生部の反対側）に鉄ノコで切れ目を入れ、破面を圧縮しないように開口した。観察はき裂の発生起点に着目して行った。撮影倍率は50倍である。

### 3. 試験結果及び検討

#### 3.1 高サイクル疲労試験結果

316FR 鋼の高温高サイクル疲労試験の結果を表 3.1 に、試験後の疲労破損試験片の外観を写真 3.1 にそれぞれ示す。表 3.1 の周波数は、約 2,000 サイクル以降における範囲を示した。なお、詳細な周波数の切替履歴を付録 1 に示した。写真 3.1 に示すき裂発生場所は、すべて試験片の平行部 15mm の範囲内であった。また、これまでに取得された低サイクル域の疲労破損データ<sup>[9~10]</sup>を付録 2 に示す。なお、表中の周波数は、ひずみ速度及び全ひずみ範囲より換算した値である。

##### (1) 疲労寿命

全ひずみ範囲( $\Delta \varepsilon$ , %)と破損繰返し数( $N_f$ )との関係を、温度毎に図 3.1～図 3.3 にそれぞれ示す。図中には、これまでに取得された低サイクル域の疲労破損データ<sup>[9~10]</sup>と、高速増殖実証炉高温構造設計方針・材料強度基準等(以下、DDS)の 316FR 鋼圧延材の最適疲労破損式<sup>[11]</sup>及び高橋らの 316FR 鋼圧延材最適疲労寿命評価式(修正版)<sup>[12]</sup>から求めた疲労曲線を併せて示す。なお、DDS の最適疲労破損式から求めた  $10^6$  サイクルを超える高サイクル域の疲労曲線は、単純外挿したものである。

本試験によって取得したデータは、図 3.1～図 3.3 の黒塗り記号で示したものであり、最長約  $5.0 \times 10^7$  サイクルまでの疲労破損データを得た。本試験で得た疲労寿命は、550°C から 650°C のいずれの温度においても DDS の 316FR 鋼圧延材の最適疲労破損式から単純外挿した曲線よりも長寿命側となっている。また、 $10^7$  サイクル域までの範囲内では、疲労寿命はひずみ範囲が小さくなるとともに長寿命側に移行しており、明瞭な疲労限や高強度鋼などで見受けられる二段折れ曲がり現象<sup>[13~15]</sup>などは認められておらず、高橋らの 316FR 鋼圧延材の最適疲労破損式で求められる曲線上にほぼ位置している。

### (2) 周波数の影響

高サイクル疲労寿命に対する周波数の影響は、破損データが少なく厳密ではないが、図3.2に示す600°Cの条件下における本試験の結果（ひずみ範囲；0.3%、周波数；10Hz）と、従来の押当てひずみ制御で得られた同ひずみ範囲の破損データ（周波数；約1.7Hz）とを比較することで確認することができる。本試験の疲労寿命は、周波数約1.7Hz条件で得られた疲労寿命の中間に位置しており、疲労寿命の周波数依存性は見られなかった。また、後項の繰返しに伴う応力変動でも明瞭な差異はみられておらず、かつ550°Cや650°Cの10-50Hzの周波数で得られた本試験の高サイクル疲労寿命と低サイクル域からの単純外挿評価との間に有意な差異もみられていない。つまり、疲労寿命に対する周波数の影響は、ひずみ範囲の小さな領域ではほとんど無視できるものと思われる。周波数の影響については、高橋らが実施した316FR鋼の高サイクル疲労試験においても、0.1Hz～10Hz程度の範囲内では同様に認められていない<sup>[12]</sup>。

### (3) 試験温度の影響

本試験で得たひずみ範囲0.3%の破損繰返し数(Nf)と試験温度(°C)との関係を図3.4に示す。図中には、これまでに得られている低サイクル域の疲労破損データ<sup>[9-10]</sup>のうち、0.35%、0.4%及び0.5%の比較的低ひずみ範囲域のデータも参考として示した。550°Cから650°Cの範囲における高サイクル域の疲労寿命には、明らかな温度依存性が認められ、同一ひずみ範囲では高温ほど短寿命側になる傾向が示され、その傾向は従来の低サイクル域の疲労破損データにおける温度依存性とほぼ同様であった。また、この傾向は、同ひずみ範囲の316FR鋼圧延材の最適疲労破損式<sup>[11]</sup>による疲労寿命の温度依存性よりも、若干大きかった。

## 3.2 応力変動

本試験で得られた550°Cから650°Cにおける繰返しに伴う応力変動を図3.5に示す。約2,000サイクルにおいて従来の押当てひずみ計による制御からレーザ変位計による制御に切り替えていた。650°Cでは押当てひずみ計制御から

レーザ変位計制御に切り替えた時にわずかな応力の変化が認められたが、その他の条件では応力の変化はほとんどなくスムーズな切替えが行われた。応力は、高ひずみ域での疲労試験と同様に徐々に増大し、オーステナイト系ステンレス鋼で一般に観察される繰返し硬化挙動を示した。また、温度が低いほど応力が大きくなっているが、その差はわずかであった。

従来の押当てひずみ計制御（周波数；約1.7Hz）とレーザ変位計制御（10Hz）とを比較した繰返し引張・圧縮に伴う応力変動を図3.6に示す。試験条件は、いずれも全ひずみ範囲0.3%、試験温度600°Cである。両者の応力変動に有意な差は認められなかった。

$N_f/2$ における応力範囲(MPa)と全ひずみ範囲( $\Delta \varepsilon_{\text{f}}$ , %)との関係を温度別に図3.7から図3.9に示す。図中にはこれまでに得られた低サイクル域のデータも示した。この結果、本試験データは、各温度とも従来データにおいてみられる全ひずみ範囲と応力範囲との関係にほぼ一致した。

### 3.3 疲労試験後の破面観察結果

疲労試験後の破面観察結果を写真3.2に示す。550°Cでは、同一条件（ひずみ範囲：0.3%）の疲労破損試験片2本のうち、1本は表面を起点として破損しているが、もう1本は表面より内部側に位置する起点から破損が生じている破面（以下、内部起点型破面）が観察された。600°Cおよび650°Cの条件では、いずれも内部起点型破面がみられた。これまでの低サイクル域での破損形態は、ほとんどが表面を起点とする破面であった<sup>[16-18]</sup>が、10<sup>7</sup>程度の高サイクル域になると内部起点型破面が観察されており、破面の形態は異なっている。従来手法の押当て型ひずみ制御の疲労試験で得られた高サイクル域での316FR鋼破損試験片2本（温度：600°C、ひずみ範囲：約0.3%、周波数：約1.7Hz）について、同様に破面を観察した。この結果、本試験に比較して周波数が小さい場合にも同様な内部起点型破面が観察されており、周波数が影響しているとは考え難い。また、このような内部起点型破面は、本試験と同一鋼種（316FR鋼）を用いた高橋らの結果<sup>[12]</sup>や低合金鋼（2.25Cr-1Mo鋼）を用いた小林らの結果<sup>[19]</sup>でも観察されており、高強度鋼に限った破損形態ではないように思われる。このような内部起点型破面は、フィッシュアイ(Fisheye)

破壊とも呼ばれ、介在物を起点として破損に至り、高強度鋼等では疲労寿命の低下がみられるケースが多い<sup>[13-15]</sup>。本試験では、未だ詳細な観察を実施していないため明らかでなく、高サイクル域における疲労破損機構の解明は今後の課題である。

### 3.4 高サイクル疲労特性の検討

平均応力効果を考慮しない場合の最適疲労破損式としては、DDS で策定された関係式が適用されているが、その適用範囲は  $10^6$  サイクルまでとなっている。 $10^6$  サイクル域を超えての上限繰返し回数の拡張については、高温構造設計・材料強度基準等の高度化に関する作業(以下、KOM-MSS)の中で、いくつかの外挿手法を用いた高サイクル疲労特性の検討が行われている<sup>[20]</sup>。本試験で得られた結果と、KOM-MSS における SUS304 鋼の高温高サイクル疲労破損式(付録 2 参照)との比較を温度別に図 3.10 から図 3.12 に示す。破損データが限られているが、KOM-MSS で検討された疲労破損式は、550°C～650°C の高サイクル域において十分保守側の評価を与えていることがわかる。図中には、同一手法を用いて得た SUS304 の破損データ<sup>[6]</sup>も併せて示している。SUS304 についても同様に保守側の評価となっている。また、316FR 鋼の疲労寿命は、低サイクル域と同様に高サイクル域においても SUS304 よりも優れた特性を示している。

#### 4. 結 言

実用高速炉の構造材料としての高速炉構造用 SUS316 (316FR 鋼) に関する高サイクル疲労線図の策定や疲労破損機構の検討に資すること狙いに、大気中におけるひずみ制御の高温高サイクル疲労試験を実施した。

以下に、これまでに得られた成果の中間まとめを示す。

- (1) レーザ変位計を用いた新しいひずみ制御方式の疲労試験技術を導入して 10～60Hz の周波数で 550℃～650℃の高温疲労試験を実施し、これまでに  $10^7$  サイクル域の高サイクル疲労破損データを取得した。
- (2)  $10^7$  サイクル域の高サイクル疲労寿命は、設計用の材料強度基準等(DDS)の最適疲労破損式から単純外挿して求められる曲線と比較して長寿命側になることがわかった。また、材料強度基準等の高度化に関する作業(KOM-MSS WG)で検討された高サイクル疲労破損式との比較評価においても、十分保守側となる結果であった。
- (3) 周波数が 0.1Hz から約 60Hzまでの範囲内では、疲労寿命に及ぼす周波数の有意な影響は認められなかった。また、高サイクル疲労寿命の温度依存性が認められた。
- (4)  $10^7$  サイクル域で疲労破損した試験片では、内部起点型の破面（フィッシュアイ）が認められた。

今後は、さらに  $10^8$  サイクル域以上の疲労破損データを取得・構築して高サイクル疲労特性を評価していくとともに、破損機構についても調査する予定である。

## 参考文献

- [1] 青木考行, 他, 敦賀発電所 2 号機化学体積制御系再生熱交換器連絡管からの漏えい原因について, 原子力 eye, vol.46, No.1, p. 75~76 (2000)
- [2] 関西電力株式会社美浜発電所 3 号機二次系配管破損事故について (最終報告書), 原子力安全・保安院, (2005)
- [3] Gelineau, O., et al., High Cycle Thermal Fatigue : experience and state of art in French LMFBRs, SMiRT16, paper, #1311 (2001)
- [4] Naoto Kasahara, Hideki Takasho, Apisara Yacumpai Structural response function approach for evaluation of thermal striping phenomena, Nuc. Des,212,P281/292,(2002)
- [5] 鬼澤高志, 加藤章一, 他, 高速炉構造材料の高サイクル疲労特性 (I) SUS304 の高温高サイクル疲労強度に関する検討 (研究報告書), JNC TN9400 2002-028, (2002)
- [6] 小高進, 加藤章一, 吉田英一, ひずみ制御による高温超高サイクル疲労試験技術, 第 42 回高温強度シンポジウム 前刷集 (2004.12.9~10), P58, (2004)
- [7] 金属材料の高温低サイクル疲労試験方法, JIS Z 2279, (1992)
- [8] 加藤 章一, 鬼澤 高志, 他, FBR 金属材料試験実施要領書 (改訂版), JNC TN9520 2001-001 (2001)
- [9] 小峰龍司, 高速炉構造設計－材料強度基準策定用 316FR 鋼の大気中材料特性試験データ, PNC TN9450 96-016, (1996)
- [10] 小高 進, 加藤 章一, 吉田 英一, 他, 316FR 鋼の材料試験データ集 (IX) JNC TN9450 2005-001 , (2005)
- [11] 日本原子力発電株式会社, 解説 高速増殖炉実証炉高温構造設計指針 材料強度基準等(案), (1999)
- [12] 高橋由紀夫, 高温高速炉用 SUS316 網の高温高サイクル疲労特性の検討 電力中央研究所, T01023, (2002)
- [13] 江村秀樹, 浅見克敏, 高強度鋼の疲労特性, 日本機械学会論文集, 55 卷 509 号, (1989)

- [14] 政木清孝, 他, HSP 处理による SUS316L 鋼の材質変化と高サイクル疲労特性, 材料, Vol.46, No.10, P1130-1135, (1997)
- [15] 中村孝, 超高サイクル疲労と試験技術, 材料試験技術, Vol.46, No.1, P15, (2001)
- [16] 平野正敦, 小峰龍司, 他, 高温ナトリウム中における SUS304 鋼の低サイクル疲労特性 (IV) 650°Cナトリウム中試験, PNC ZN941 80-96, (1980)
- [17] 加藤信一郎, 小峰龍司, 他, SUS304 鋼の高温流動ナトリウム中における低サイクル疲労特性, 材料, 第 37 卷 第 414 号 P328~333, (1988)
- [18] ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社, ステンレス協会, P199~200 (1995)
- [19] 小林英男, 他, 2.25Cr-1Mo 改良鋼の高温超高サイクル疲労特性と破壊メカニズム, 日本機械学会 No.03-11, 材料力学部門講演会講演論文集 (2003.9.24~26), P353, (2003)
- [20] 高速増殖炉高温構造設計基準材料強度基準等の高度化に関する検討報告 (1) : 昭和 62 年度 KOM-MSS W/G 活動報告, PNC TN9410 88-105, (1988)

表2.1 供試材の寸法、熱処理条件等

種類	製品区分	素材識別番号	素材寸法 (mm)			ヒート番号	熱処理				
			t	w	0/D		方法	温度(°C)	保持時間(hr)	冷却方法	
母材	板材	B8	40	1000	—	1000	50492	S T	1050	0.93	WQ

表2.2 供試材の引張、硬さ試験

試験片規格	試験片温度(°C)	引張試験			硬さ試験	
		0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	破断伸び(%)	試験方法	硬さ
JIS	R.T.	294	583	52.5	Brinell	1559

表2.3 供試材の化学成分

素材No.	ヒート番号	分析方法	化学成分 (mass.%)																
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Co	Ti	Nb+Ta	B	As	N	O
B8	50492	Ladle	0.01	0.47	1.05	0.026	0.001	12.31	17.58	2.46	—	—	0.06	—	—	—	—	0.1	—
		Check	0.012	0.47	1.04	0.024	0.001	12.25	17.61	2.48	0.14	0.044	0.06	0.001	0.01	0.0002	0.004	0.1	0.0056

表 2.4 高サイクル疲労試験装置の概略仕様

試験機番号		HCF-32	
試 験 機	形式	油圧式	
	最大荷重	静的	15 kN
		動的	10 kN
本 体	最大ストローク		10 mm
	制御方式		荷重、ひずみ、ストローク、非接触式ひずみ計（レーザ型）
	対応	荷重制御	0.01 Hz ~ 500 Hz
ひ ず み 測 定	周波数	ひずみ制御	0.01 Hz ~ 100 Hz
	形式		押当て型
	検出器		ひずみゲージ式
	測定範囲		±1 mm (GL=12 mm)
	測定レンジ		±1, ±0.5, ±0.2, ±0.1 mm
	精度		フルスケールの±1.0%
	計測制御周波数		0.01~0.2 Hz
	モニター周波数		同上
加 熱 装 置	形式		高周波誘導
	常用温度範囲		最高温度 800°C MAX 5 kw
	熱電対		R 热电对
	制御方式		PID 制御方式

表3.1 高サイクル疲労試験の結果

試験 雰囲気	素材 識別 番号	試験 温度 (°C)	試験片 番号	全ひずみ 範囲 $\angle \varepsilon_t$ (%)	周波数 (Hz)	破損 繰返し数 (Nf)	Nf/2における値		
							Nf/2 (cycles)	レーザ 変位量 $\angle L_t$ ( $\mu m$ )	最大 応力 $\sigma_{max}$ (MPa)
大気中	B 8	550	HB8A05	0.300	10~50	38,228,444	20,002,003	117.2	214.3
			HB8A06	0.300	15~50	49,992,921	25,320,364	117.0	211.3
		600	HB8A01	0.300	10	6,102,747	3,002,003	110.0	178.3
	650	HB8A02*	0.270	10~60	25,011,757	—	—	—	—
			HB8A03	0.300	10	2,580,080	1,202,003	108.3	165.8
									334.4

※:HB8A02は未破損データである。

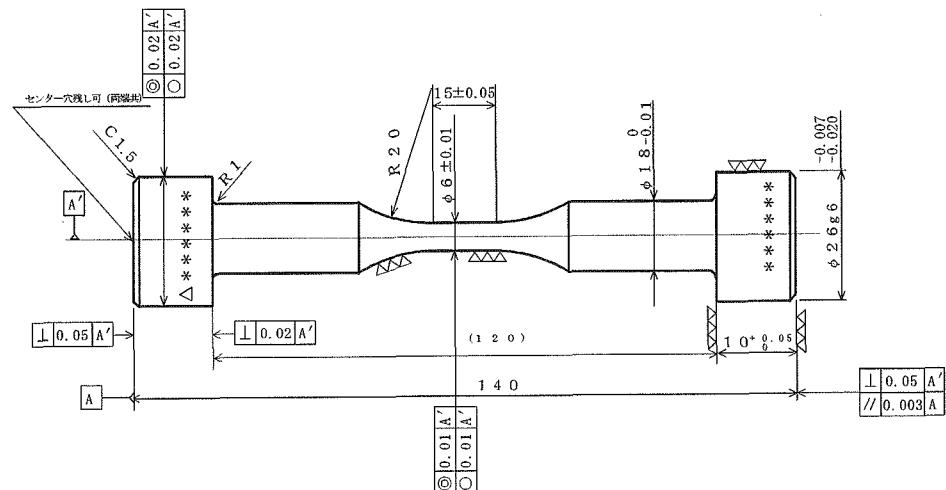


図 2.1 疲労試験片形状

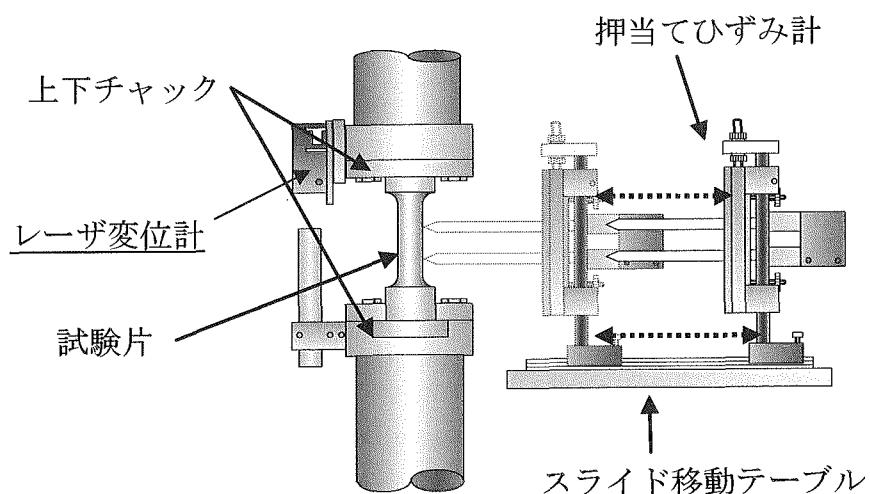


図 2.2 試験片周りの主要構成図

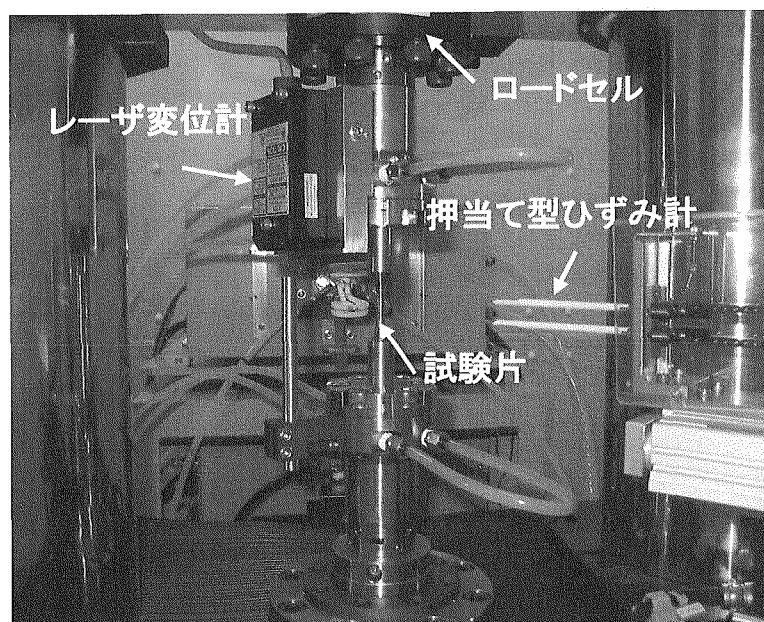


図 2.3 試験片周りの主要構成写真

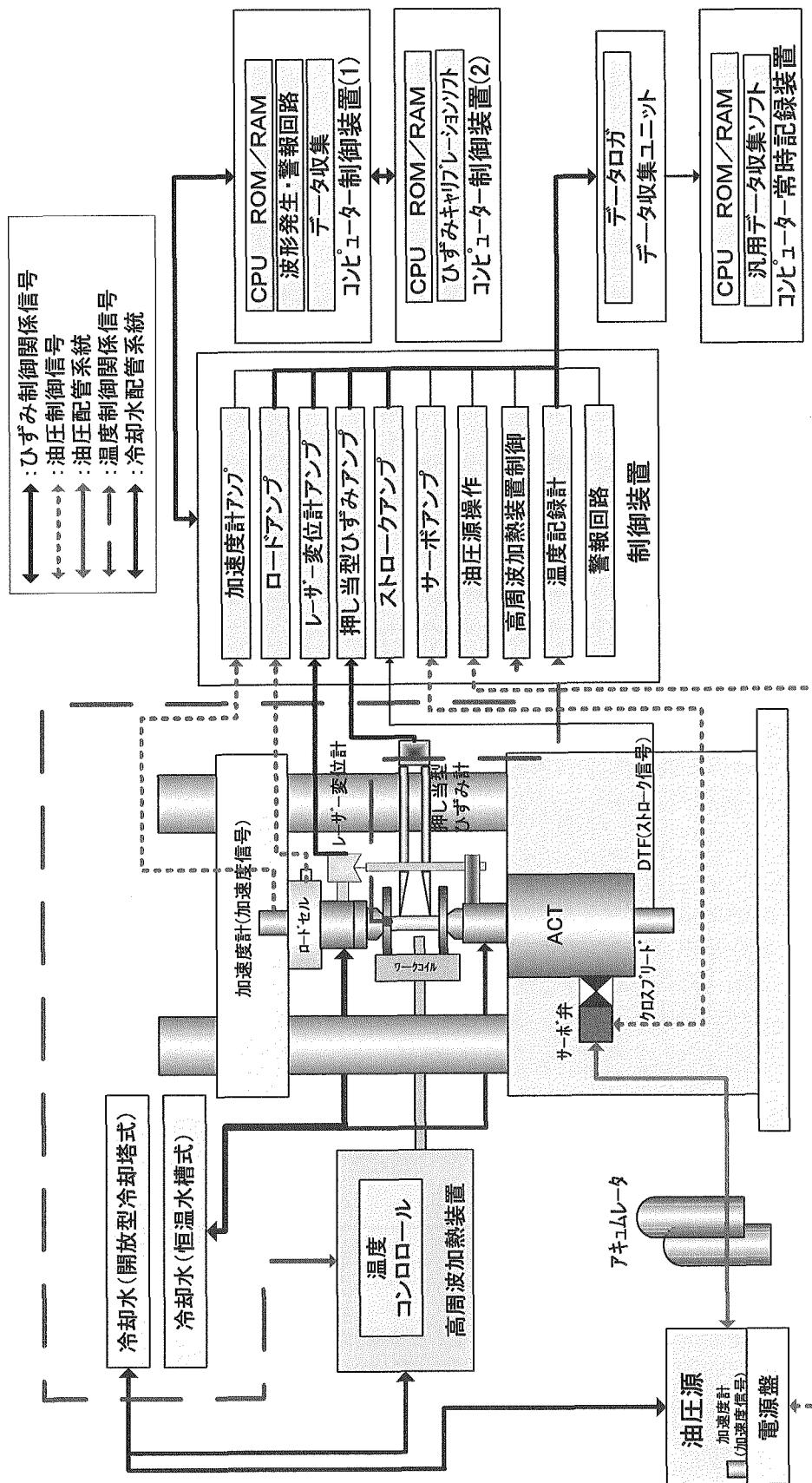


図2.4 高サイクル疲労試験装置の全体構成

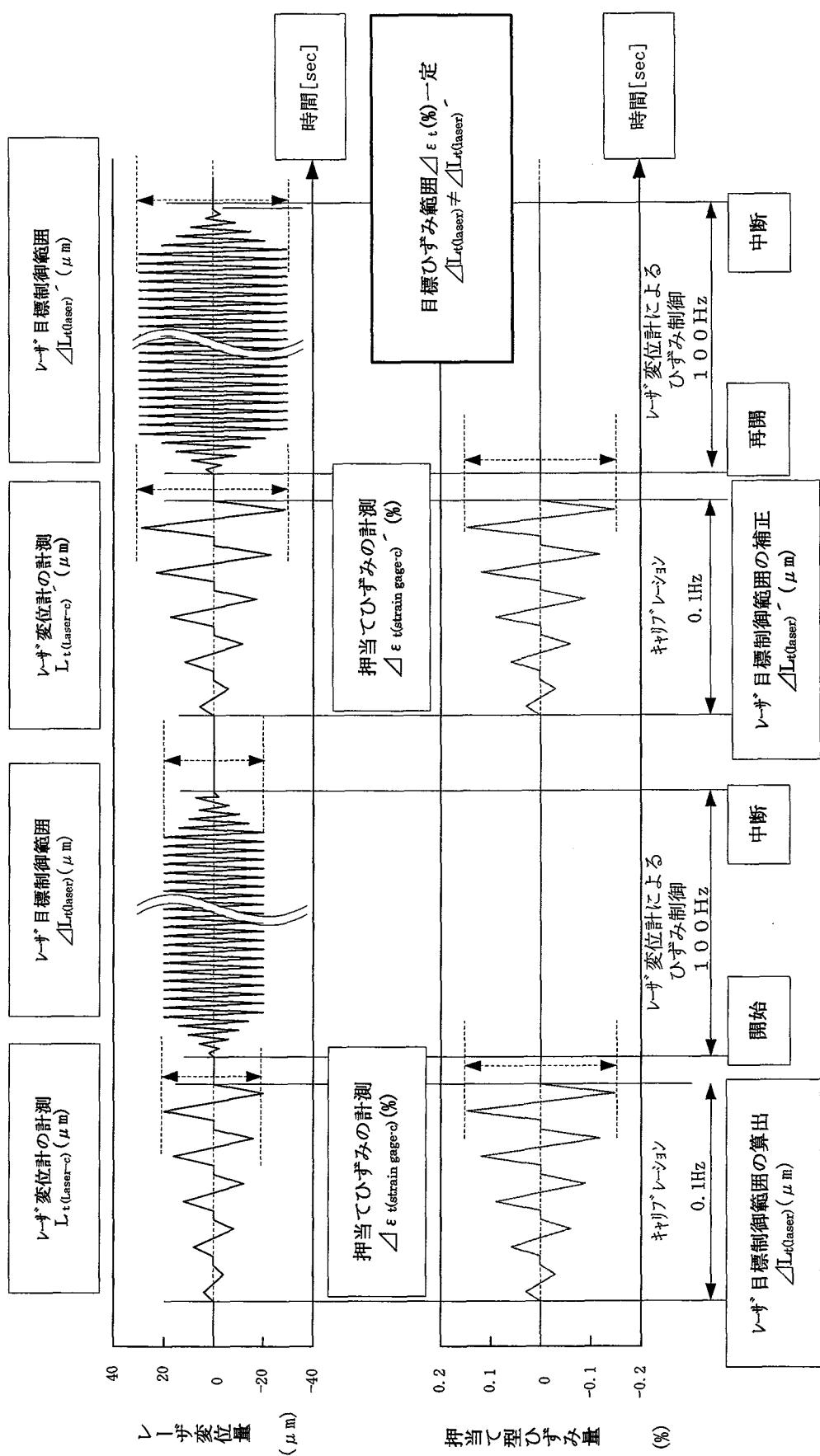
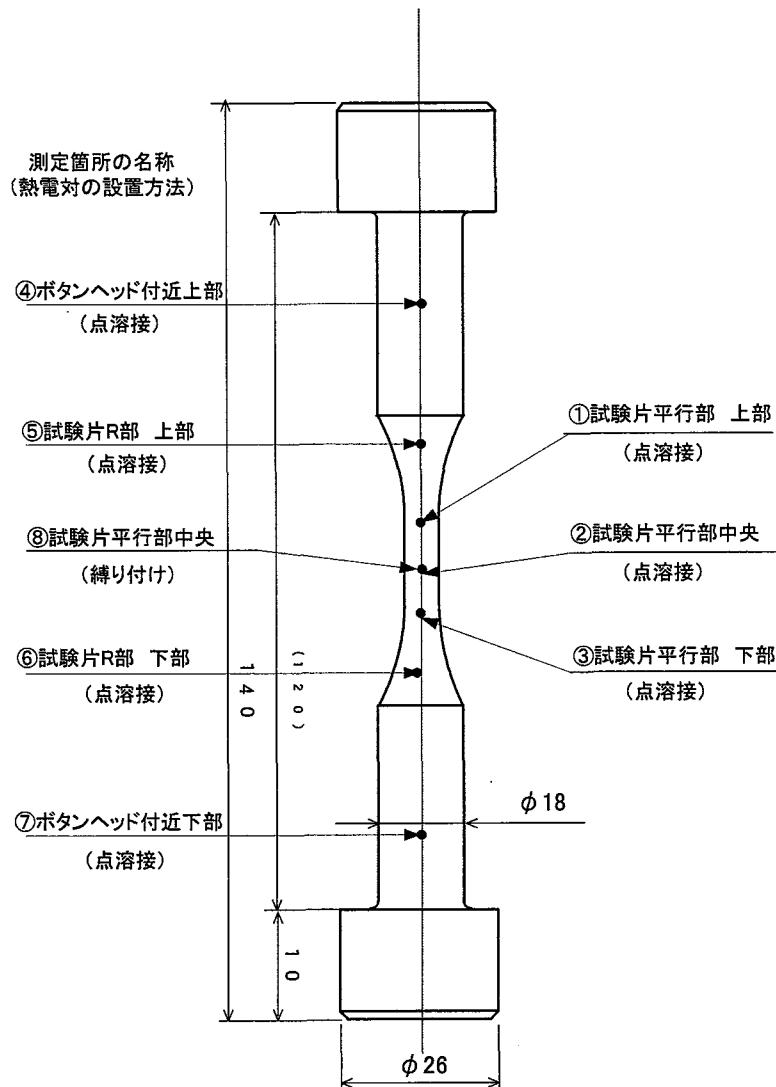


図2.5 動作原理



但し、試験開始前の温度分布確認の測定箇所①～⑦とし、試験中の測定箇所④～⑧とする。

図 2.6 試験片の温度測定箇所（標準例）

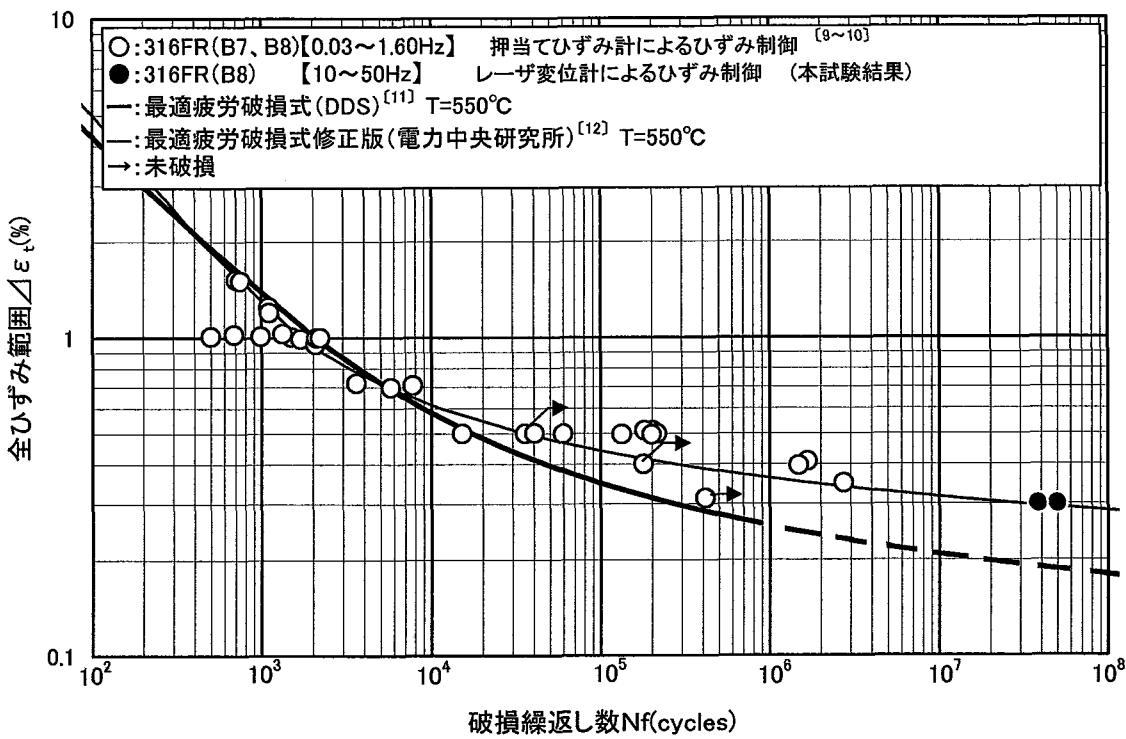


図3.1 316FR鋼の疲労寿命特性(550°C)

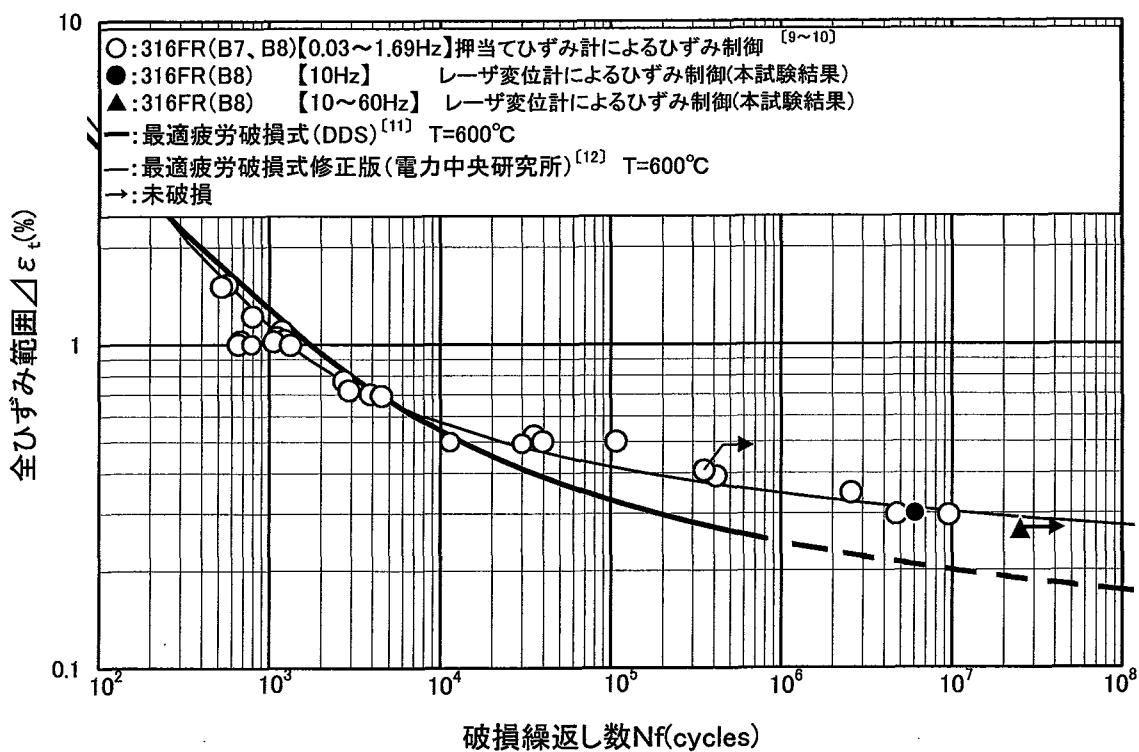


図3.2 316FR鋼の疲労寿命特性(600°C)

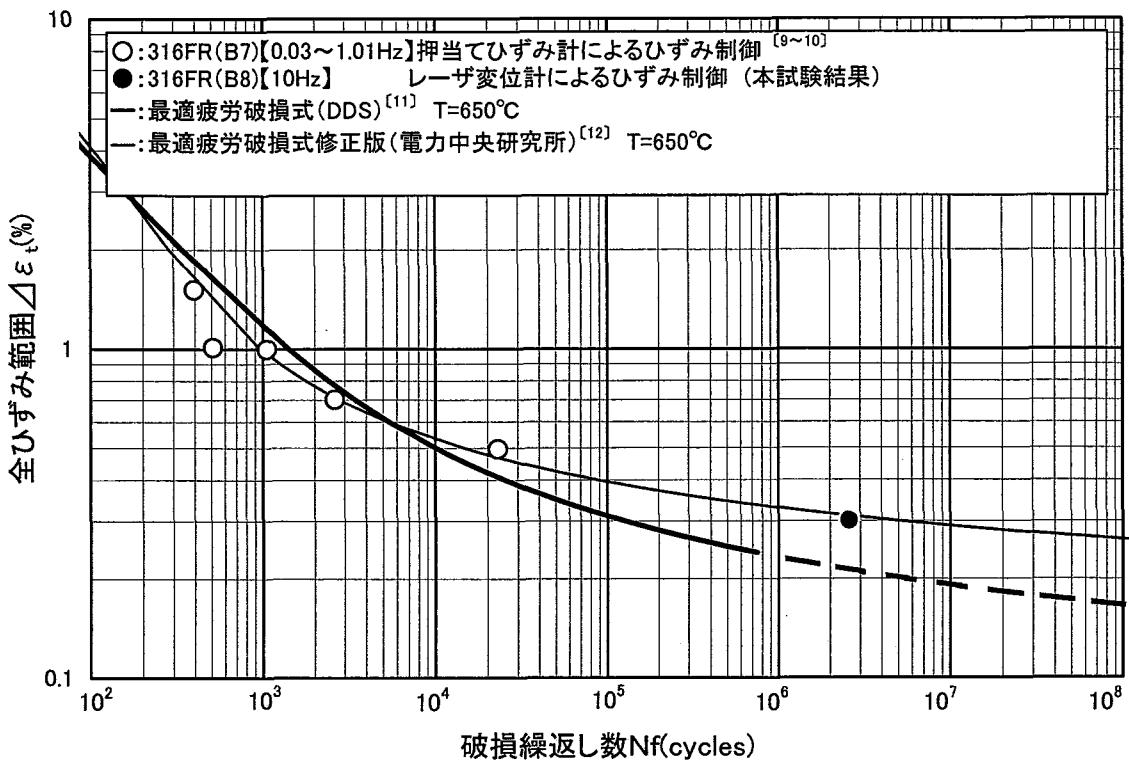
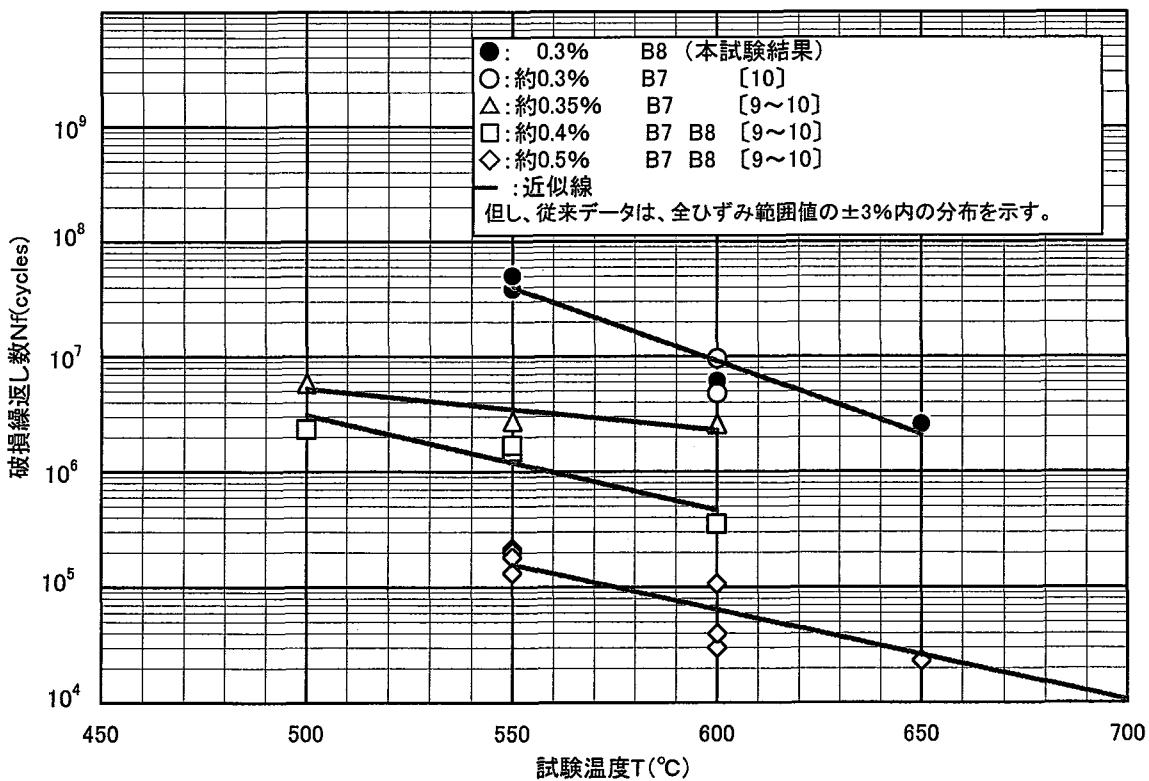
図3.3 316FR鋼の疲労寿命特性( $650^\circ\text{C}$ )

図3.4 疲労寿命と試験温度の関係

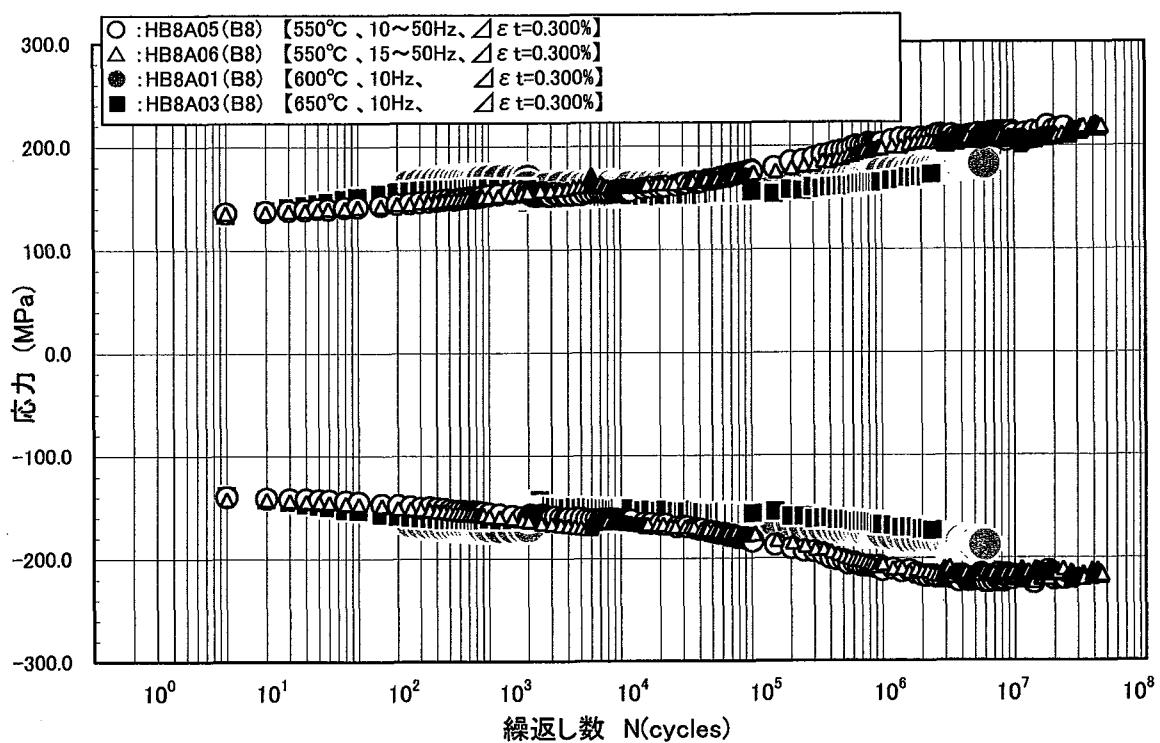


図3.5 繰返しに伴う応力変動

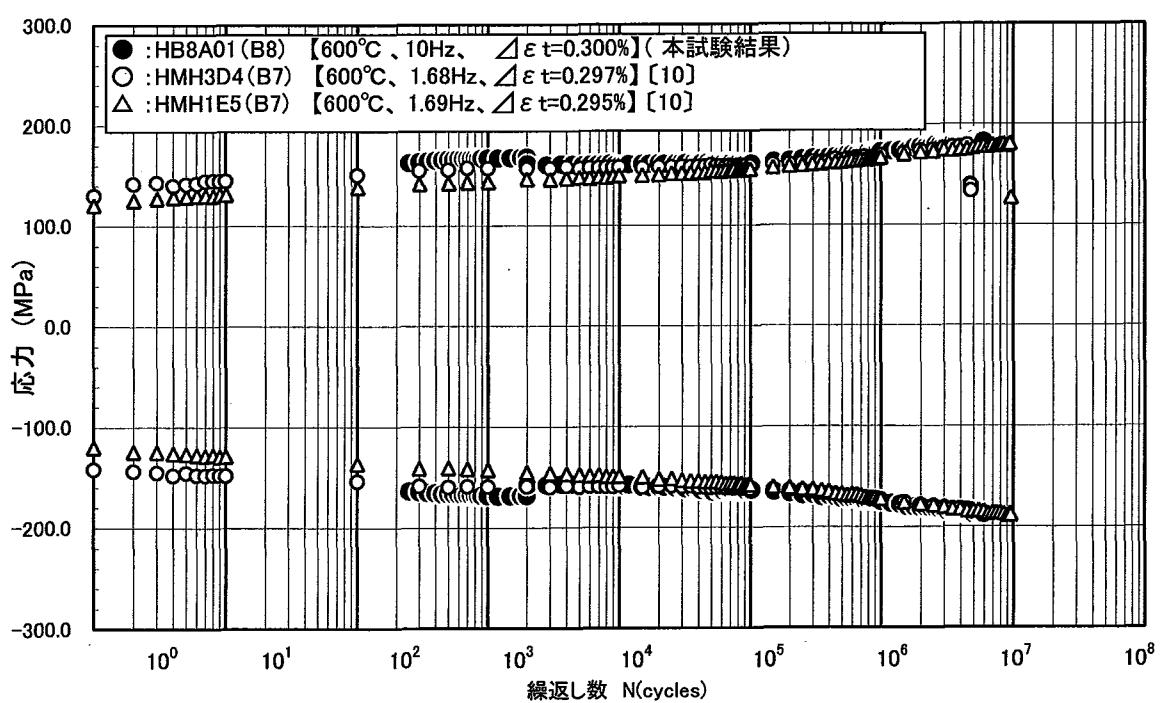


図3.6 繰返しに伴う応力変動(周波数の影響)

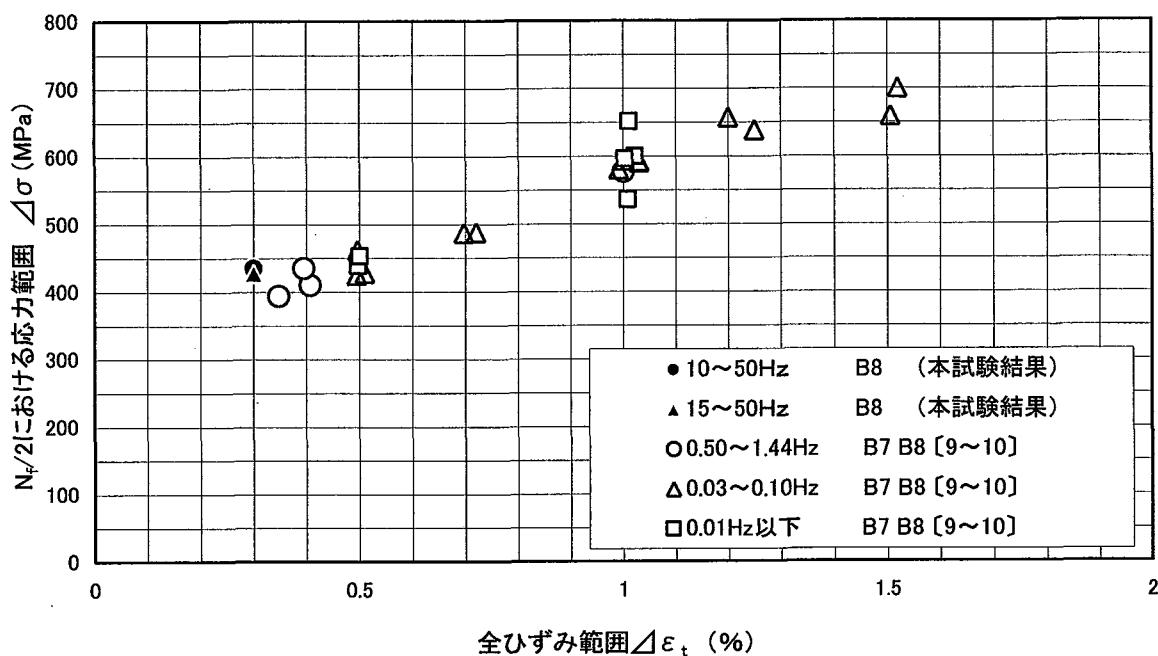


図3.7 応力範囲と全ひずみ範囲の関係(550°C)

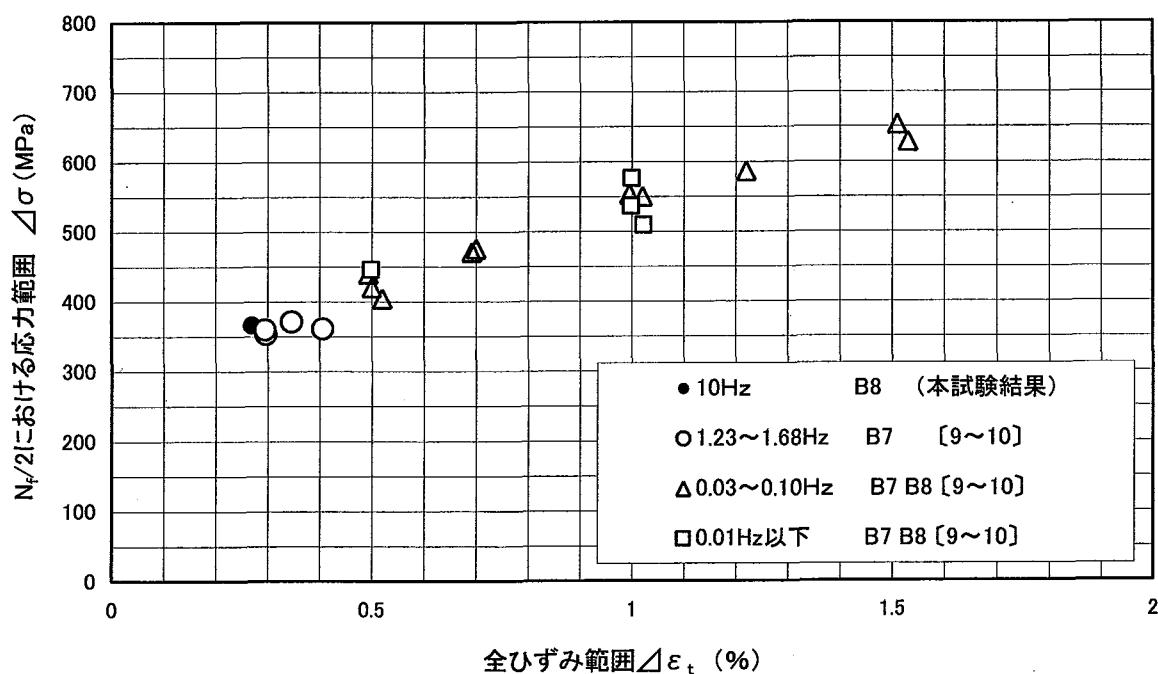


図3.8 応力範囲と全ひずみ範囲の関係 (600°C)

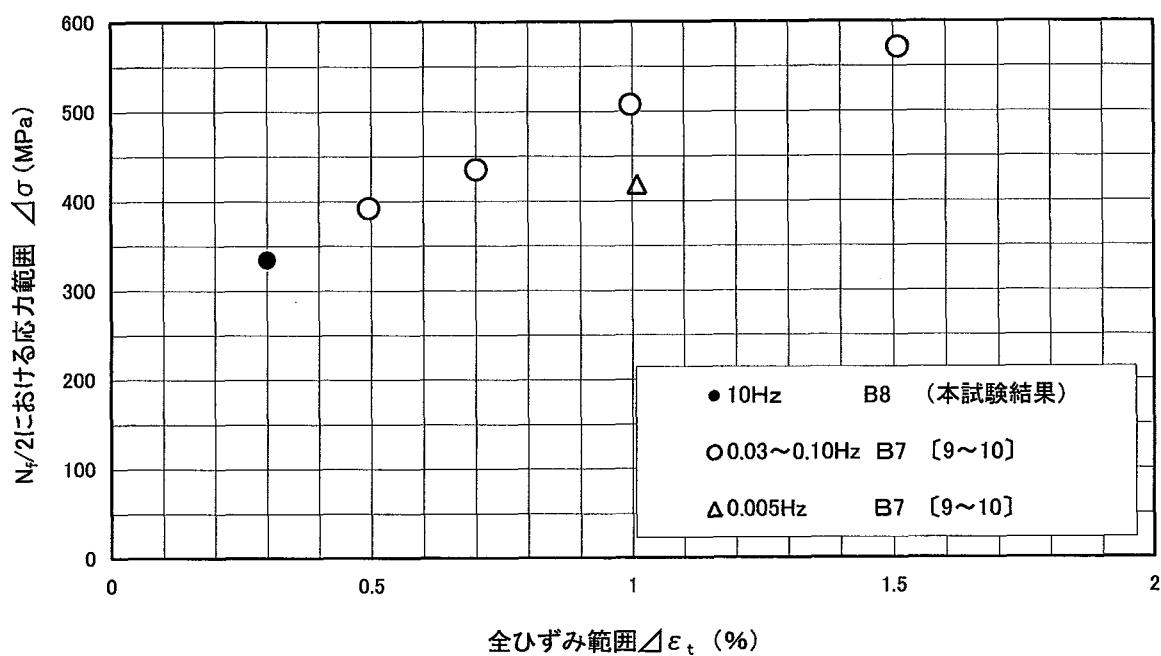


図3.9 応力範囲と全ひずみ範囲の関係 (650°C)

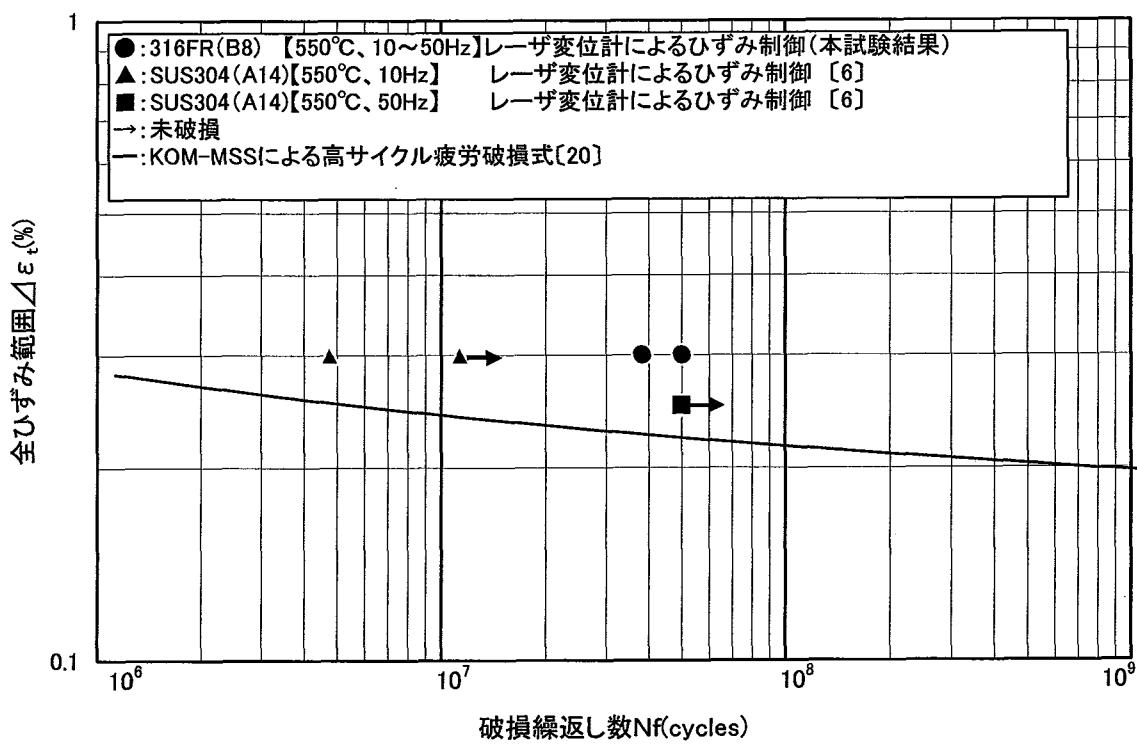


図3.10 KOM-MSSにおける高サイクル疲労破損式との比較 (550°C)

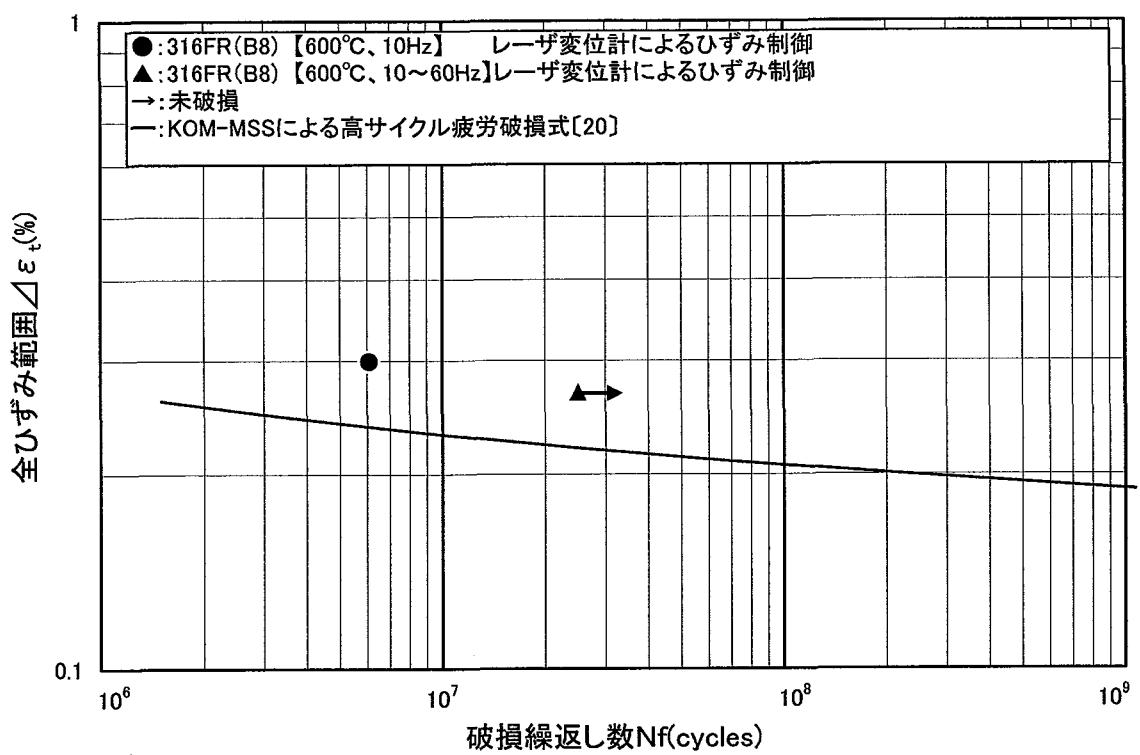


図3.11 KOM-MSSにおける高サイクル疲労破損式との比較(600°C)

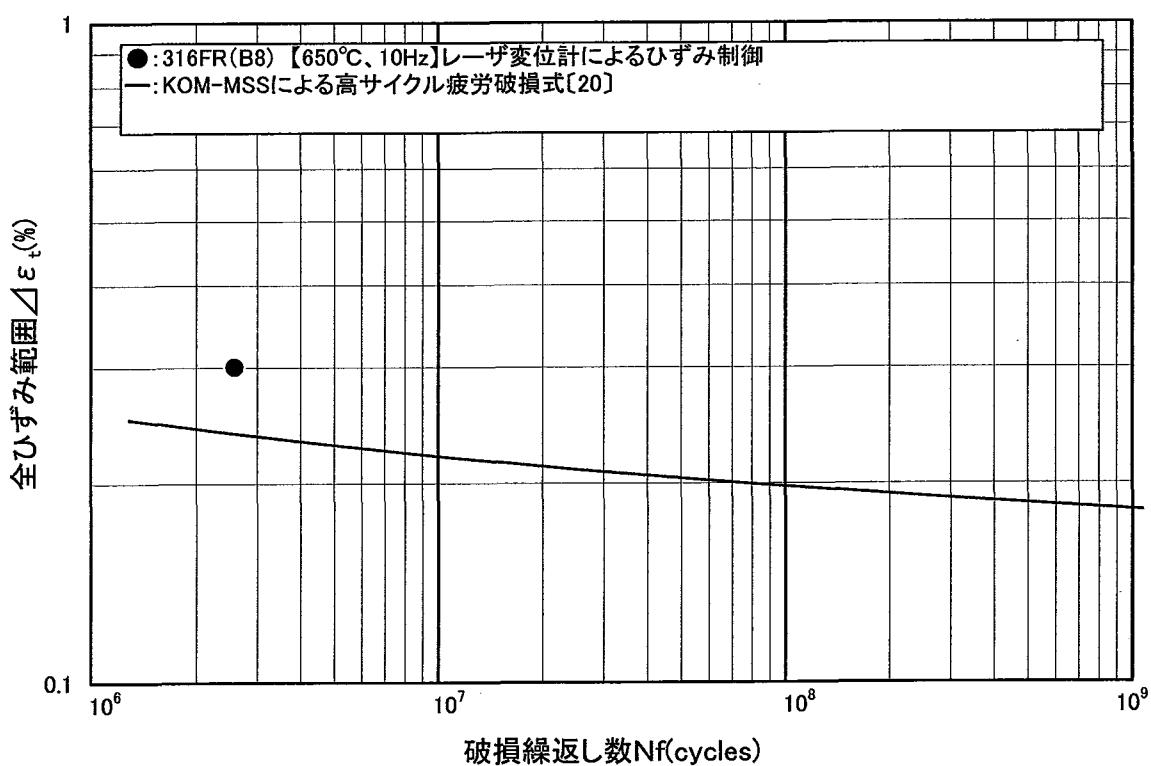


図3.12 KOM-MSSにおける高サイクル疲労破損式との比較(650°C)

写真3.1 疲労試験片の外観

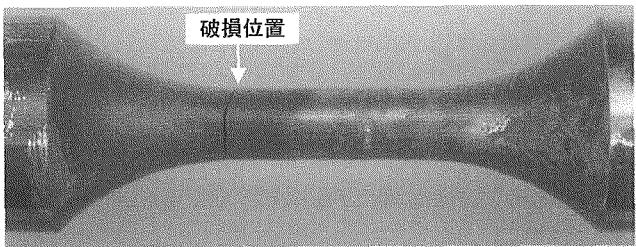
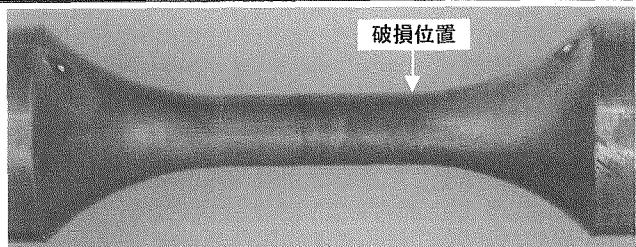
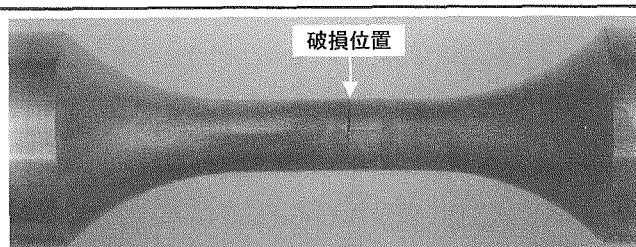
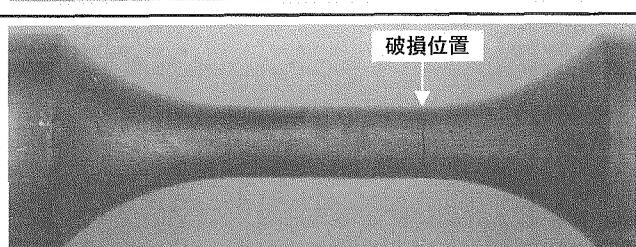
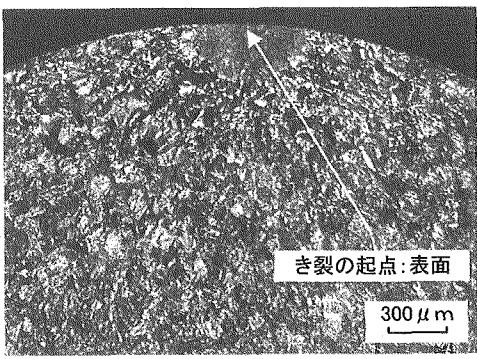
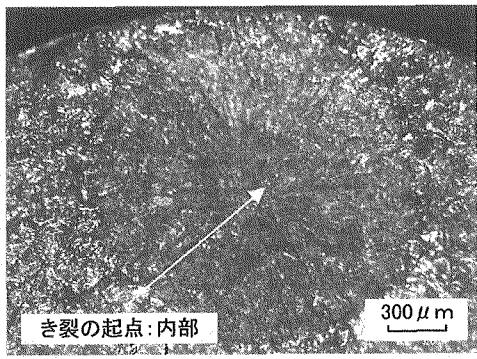
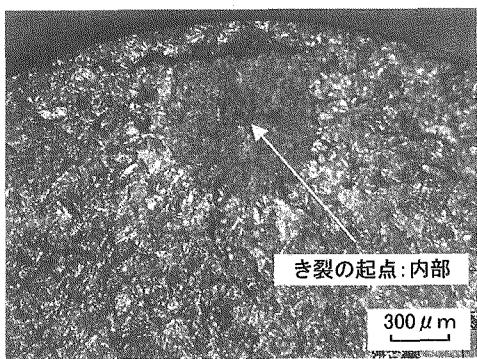
温度 (°C)	試験片 番号	ひずみ 速度 (Hz)	全ひずみ 範囲 $\Delta \varepsilon_t$ (%)	破損 繰返し数 Nf (cycles)	試験片の外観
550	HB8A05	10~50	0.300	38,228,444	
	HB8A06	15~50		49,992,921	
	HB8A01	10		6,102,747	
650	HB8A03	10		2,580,080	

写真3.2 疲労試験片の破面観察結果

温度 (°C)	試験片 番号	ひずみ 速度 (Hz)	全ひずみ 範囲 $\Delta \varepsilon_t$ (%)	破損 繰返し数 Nf (cycles)	試験片の破面
550	HB8A05	10~50	0.300	38,228,444	 き裂の起点:表面 300 μm
	HB8A06	15~50		49,992,921	 き裂の起点:内部 300 μm
600	HB8A01	10	0.300	6,102,747	 き裂の起点:内部 300 μm
650	HB8A03	10		2,580,080	 き裂の起点:内部 300 μm

## 付録

付録 1 周波数の切替履歴

付録 2 大気中疲労試験データ (316FR 鋼：母材-受入材)

付録 3 SUS304 鋼の高サイクル疲労破損式 ( $>10^6$  サイクル)

## 付録1 周波数の切替履歴

試験 温度 (°C)	試験片 番号	全ひずみ 範囲 (%)	平均 周波数 (Hz)	制御の切替順序及び履歴			備 考
				制御 方法	周波数 (Hz)	周波数別 繰返し数 (cycles)	
550	HB8A05	0.300	13.28	押当て	0.1	2,002	2,002
				レーザ	10	35,076,000	35,078,002
				レーザ	20	9,110	35,087,112
				レーザ	30	12,519	35,099,631
				レーザ	40	12,503	35,112,134
550	HB8A06	0.300	43.69	押当て	0.1	3,116,310	38,228,444
				レーザ	15	2,921,133	2,927,135
				レーザ	25	8,330,017	11,257,152
				レーザ	35	25,110	11,282,262
				レーザ	40	38,102	11,320,364
600	HB8A01	0.300	10.00	レーザ	50	15,426,018	26,746,382
				レーザ	30	198,702	26,945,084
				レーザ	50	23,047,837	49,992,921
				押当て	0.1	2,002	50Hzにて試験継続しました。
				レーザ	10	6,100,745	6,102,747
650	HB8A02	0.270	—	押当て	0.1	2,002	2,002
				レーザ	10	11,240,000	11,242,002
				レーザ	20	13,762,501	25,004,503
650	HB8A03	0.300	9.99	レーザ	20~60	7,254	25,011,757
				押当て	0.1	2,002	2,002
				レーザ	10	2,578,078	2,580,080

但し、平均周波数は、試験開始から破損終了までの1秒あたりの平均とする。

## 付録2 大気中疲労試験データ (316FR鋼：母材-受入材) (9~10) 1/2

種類	履歴	環境	製品区分	素材識別番号	試験番号	試験温度(℃)	拳動		引張側	圧縮側	垂れ速度(%/sec)	周波数(Hz)	平均歪み(%)	全歪み範囲(%)	破損又は最大繰り返し数(cycles)	破断位置	備考
							応力 変化 比	応力 変化 法									
500	B7	大気中	受入材	HMH1B7	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.03	0.0	1.508	1578	A	
				HMH8B6	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	0.991	3436	A	
				HMH8B5	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.698	8301	A	
				HMH8B4	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.492	533979	NONF	
				HMH1E8	O	O	A	1	1	0.001	0.001	0.0005	0.0	1.007	882	A	
				HMH1B8	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.03	0.0	1.512	897	A	
				HMH8B9	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	0.992	2559	A	
				HMH8B8	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.699	6316	A	
				HMH1E0	O	O	O	1	1	1.0	1.0	1.27	0.0	0.394	2332760	B	
				HMH1D0	O	O	O	1	1	1.0	1.0	1.32	0.0	0.379	2816758	A	
550	HM1C0	母材	受入材	HMH1E1	O	O	A	1	1	1.0	1.0	1.46	0.0	0.343	5693997	B	
				HMH3F0	O	O	O	1	1	0.0001	0.0001	0.0005	0.0	1.009	501	A	
				HMH1E2	O	O	O	1	1	0.001	0.001	0.0005	0.0	1.023	683	A	
				HMH1D7	O	O	O	1	1	0.001	0.001	0.0010	0.0	0.499	35544	NONF	
				HMH1D5	O	O	O	1	1	0.01	0.01	0.005	0.0	1.004	1503	A	
				HMH1E4	O	O	O	1	1	0.01	0.01	0.010	0.0	0.498	59806	A	
				FLB01	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.03	0.0	1.52	704	B	
				HMH1C2	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.03	0.0	1.507	747	A	
				FLB02	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.04	0.0	1.25	1099	A	
				FLB03	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	1.03	1334	A	
550	HM1C0	板材	受入材	FCB05	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	1.03	1334	A	
				HMH8C2	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	0.991	1702	A	
				FLB04	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.72	3604	A	
				HMH8C1	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.697	5750	A	
				FLB05	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.51	180828	A	
				HMH8B1	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.498	214218	A	
				HMH8C0	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.495	199433	A	
				HMH1C9	O	O	O	1	1	1.0	1.0	1.23	0.0	0.407	1675483	A	
				HMH1D9	O	O	O	1	1	1.0	1.0	1.44	0.0	0.348	2736418	A	
				HMH1E3	O	O	O	1	1	0.001	0.001	0.0005	0.0	1.023	678	A	
550	HM1E7	HM1C0	母材	FL01	O	O	O	1	1	0.01	0.01	0.005	0.0	0.999	657	A	
				HM1C0	O	O	O	1	1	0.1	0.1	0.03	0.0	1.53	564	B	
										0.1	0.1	0.03	0.0	1.509	522	A	

## 付録2 大気中疲労試験データ (316FR鋼: 母材-受入材) [9~10] 2/2

種類	履歴	環境	製品区分	素材識別番号	試験温度(°C)	試験片番号	拳動	ヒズ引変化	応力方法	制御	歪み種類	歪み波形	歪み	引張側	圧縮側	歪み速度(%/sec)	周波数(Hz)	平均歪み(%)	全歪み範囲(%)	破損又は最大繰り返し数(cycles)	備考				
B7				FL02		A	1	1	0.1	0.1	0.04	0.0	1.22			796	B								
				FL03		A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	1.02			1064	B								
				HMH8C5	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	0.995			1332	A							
				FL04	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.7			3891	A							
				HMH8C4	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.692			4532	A							
				FL05	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.52			35184	A							
				HMH8C9	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.5			106796	A							
				HMH1C8	O	O	O	A	1	1	1.0	1.0	1.23	0.0	0.406			350425	B						
				HMH1D2	O	O	O	A	1	1	1.0	1.0	1.45	0.0	0.346			2568776	A						
				HMH3D4	O	O	O	A	1	1	1.0	1.0	1.68	0.0	0.297			4155913	A						
B8				HMH1E5	O	O	O	A	1	1	1.0	1.0	1.69	0.0	0.295			9582238	A						
				HMH3D5	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.005	0.0	1.009			509	A						
				HMH1C1	O	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.03	0.0	1.509			395	A						
				HMH8C8	O	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	0.997			1053	A						
				HMH8C7	O	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.07	0.0	0.701			2632	A						
				HMH8D0	O	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.496			23048	A						
				HNH8A9	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.005	0.0	0.999			1744	A						
				HNH8A0	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.010	0.0	0.494			240926	A						
				6-06				A	1	1	0.1	0.1	0.04	0.0	1.2			1441	A						
				6-07				A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	1.0			2932	A						
B8				HFB816				A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	0.972			2519	B						
				6-14				A	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.5			19200	A						
				6-15				A	1	1	0.1	0.1	0.13	0.0	0.4			220000	NONF						
				HNH8A6	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.005	0.0	1.012			991	A						
				HNH8A7	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.010	0.0	0.501			40305	A						
				6-01				A	1	1	0.1	0.1	0.04	0.0	1.2			1110	A						
				6-04				A	1	1	0.1	0.1	0.05	0.0	1.0			2105	A						
				HFB804				A	1	1	1.0	1.0	0.50	0.0	0.496			132847	A						
				HNH8A1	O	O	O	A	1	1	1.0	1.0	1.27	0.0	0.395			178307	NONF						
				HNH8A8	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.005	0.0	1.0			1489207	A						
B8				HNH8B0	O	O	O	A	1	1	0.01	0.01	0.010	0.0	0.499			785	A						
				HNH8B3	O	O	O	A	1	1	0.1	0.1	0.10	0.0	0.493			11366	A						
板 材 大 気 中 受 入 材 母 材																									

付録 3 SUS304 鋼の高サイクル疲労破損式<sup>[18]</sup> (>10<sup>6</sup> サイクル)

$$(\log_{10} N_f)^{-\frac{1}{2}} = A_0 + A_1 S + A_2 S^2 + A_3 S^3 + A_4 S^4$$

ただし、 $S = \log_{10} (\Delta \varepsilon_t)$ , Tは温度 (°C)

$A_0$	1.915063
$A_1$	$1.627233 - 0.7541475 \times 10^{-4} \times T$
$A_2$	0.5502991
$A_3$	0.0
$A_4$	$-0.2464511 \times 10^{-1}$