

JNC TY4400 2002-003

高温環境下の超長寿命疲労強度特性の解明に向けた

疲労試験装置の開発

平成 13 年度

(共同研究報告書)

2002 年 3 月

福井大学

核燃料サイクル開発機構
敦賀本部

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。

〒319-1184 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed :

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)

2002

2002年3月

高温環境下の超長寿命疲労強度特性の解明に向けた疲労試験装置の開発

平成13年度

(共同研究報告書)

服部 修次*

伊藤 隆基*

要旨

高速増殖炉構造物の強度的な安全性、健全性、信頼性を著しく向上させることを目的とし、超長寿命領域（ギガサイクル）での試験実施を可能とする超音波振動式超長寿命疲労試験装置を開発した。この試験装置は、コンバータ（ピエゾ素子）によって発生した 20kHz の振動が、ブースタ、ホーンで増幅されて試験片に伝わり、試験片に繰返し応力を発生させることができる疲労試験機である。従来の油圧サーボ式疲労試験機と違い、超音波振動式疲労試験装置では共振を利用しているため、試験片自体の質量が反力の役目を果たしているので、試験片の片側を固定する必要がなく、試験片の変位を計測することで試験片の内部に発生する最大ひずみおよび最大応力を計算することができる。本試験装置の開発により、高速増殖炉用材料を対象としたギガサイクルでの加速疲労試験が可能となった。すなわち、試験で得られた寿命データを基に超長寿命疲労強度特性を明らかにすることによって、適切な寿命予測のための材料強度情報や設計・保守点検時の基礎資料を提供し、構造物の安全性、健全性、信頼性の向上に寄与できるものと期待できる。

本報告書では、開発した超音波振動式超長寿命疲労試験装置の仕様および特徴について報告する。

以上

*福井大学 工学部 機械工学科

本報告書は、福井大学 工学部 機械工学科 服部修次教授、伊藤隆基助手が核燃料サイクル開発機構との共同研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室：敦賀本部 国際技術センター プラント機器技術開発 Gr

契約番号：1302A02405

March, 2002

Development of the Ultrasonic Fatigue Testing Machine Due to study on
Giga-Cycle Fatigue at Elevated Temperature
2001 Annual Report
(Document on Collaborative Study)

Shuji HATTORI^{*} and Takamoto ITOH^{*}

Abstract

An ultrasonic fatigue testing machine was developed to obtain the giga-cycle fatigue life at elevated temperature for safety and reliability of structural components in the faster breeder reactor (FBR). This testing machine consists of an amplifier, booster, horn and the equipments such as a system controller and data acquisition. The test specimen is attached at the end of the horn. The electric power generated in the amplifier is transformed into the mechanical vibration in the converter and is magnified in the booster and horn. The vibration was enough to fatigue the specimen. Since the test frequency is set at a resonant frequency, the shape and dimensions of specimen were designed so as to vibrate itself resonantly. However, the maximum amplitudes of stress and strain in the specimen can be calculated easily by measuring the amplitude of displacement at the end of the specimen. The developed ultrasonic fatigue testing machine enables to carry out the fatigue tests at 20kHz so that it can perform the giga-cycle fatigue test within a very short time as compared with the regular fatigue testing machines such as a hydraulic fatigue testing machine. By clarifying the material strength characteristics in giga-cycle region, the life evaluation, design and examination of components will be more suitable than ever. This study will contribute to improve the safety and reliability of components in FBR.

In this technical report, the specification and characteristics of the testing machine were described along with the several experimental results.

^{*} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University
This work was performed by Fukui University under the collaborative contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC).

JNC Liaison: Plant Technology Development Group, International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office
The contract number:1302A02405

目 次

1. 目 的.....	1
2. 超音波振動式疲労試験装置	3
2.1 超音波振動式疲労試験装置の原理	3
2.2 超音波振動式疲労試験装置の概要	6
2.3 試験片	10
2.4 試験方法.....	13
2.4.1 試験機計測制御方法.....	13
2.4.2 応力とひずみの求め方	16
3. 予備試験結果.....	18
3.1 応力およびひずみ振幅	18
3.2 破損試験片	22
3.3 間欠試験による試験片の温度上昇	22
3.4 まとめ	23
4. 今後の展開	24
参考文献.....	25

表目次

表 2.1 超音波振動式疲労試験装置の構成.....	8
表 2.2 超音波振動式疲労試験装置の主な仕様.....	8
表 2.3 試験片の特徴	11
表 3.1 化学成分	18
表 3.2 機械的性質	18

図目次

図 1.1 高強度材料の超寿命疲労の S-N 曲線.....	1
図 2.1 超音波振動式疲労試験機の動作原理	3
図 2.2 超音波振動式疲労試験機の応力および振動振幅の分布	4
図 2.3 試験装置の概略.....	9
図 2.4 試験装置の概略写真.....	9
図 2.5 試験可能な試験片の形状の種類	10
図 2.6 本研究で採用した試験片	12
図 2.7 振動装置の on-off 制御.....	13
図 2.8 試験計測制御設定画面	15
図 2.9 応力・ひずみ振幅の計測.....	17
図 3.1 標点部でのひずみ振幅と振動発信器アンプ出力との関係	19
図 3.2 標点部でのひずみ振幅と試験片端の変位振幅との関係	19
図 3.3 実験中の標点部でのひずみ波形	21
図 3.4 破損した試験片写真	22
図 3.5 間欠運転における試験片温度上昇.....	23

1. 目的

金属材料の疲労特性については、多くの鉄鋼材料に関し $N = 10^5 \sim 10^6$ 程度の応力繰返し数で S-N 曲線が水平に折れ曲がり、明瞭な疲労限度が現れるが、高強度鋼や表面処理材に関しては、S-N 曲線が $N = 10^5 \sim 10^6$ 付近で一旦水平に折れ曲がって見掛けの疲労限度が現れた後、 $N = 10^7$ 付近から S-N 曲線が再び低下する 2 段折れ曲がり現象が現れる[1-9]。 $N = 10^7$ 付近から S-N 曲線が低下する試験片の破面には、フィッシュアイが観察されるため内部起点型破壊であることが分かっているが、き裂発生のメカニズムについてはほとんど明らかになっていない。このことは、従来の高サイクル疲労の結果を 10^7 以上の超高サイクル疲労へと外挿することが非常に危険であることを意味している。

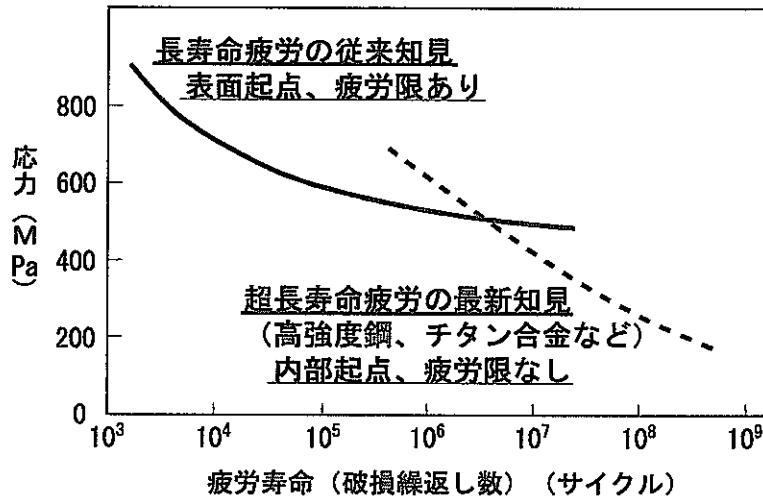


図 1.1 高強度材料の超寿命疲労の S-N 曲線

一方、高速増殖炉の中で、高サイクル疲労の発生が予想される箇所は、熱疲労を受ける炉心出口部、DNB 振動を受ける蒸発器伝熱管などである。しかし、破損モードとしての疲労の考慮は、速度効果・クリープ効果を加味した低サイクル疲労やサーマルストライピングを模擬した各種平均応力下の引張圧縮疲労試験の実施に留まり、内部起点型破壊の超高サイクル疲労については、考慮されていない。したがって、高速増殖炉構造材料について超長寿命疲労強度特性を十分把握し、適切な寿命予測のための材料強度情報や設計・保守点検時の基礎資料を提供することは、構造物の安全性、健全性、信頼性を著しく向上させる上で、最重要課題であると言える。

ところが、ギガサイクルでの長寿命疲労試験を実施するには、従来の回転曲げや油圧サ

一ボ式軸荷重繰返しによる疲労破壊試験方法では、单一条件でも試験期間が非常に長期化するために様々な条件下で行った試験データの取得は実質的には不可能である。例えば、 10^9 サイクルの疲労試験データを得るには、10Hz の繰返し速度では約 1440 時間（1.6 年）の試験時間を要してしまう。したがって、環境・応力振幅などの種々の因子が疲労強度に与える影響について実験的に検討を行うためには、短時間で試験を実施することができる高速疲労試験装置が必要となる。

そこで本共同研究では、ギガサイクルオーダでの疲労試験を短期間で行うことのできる超音波振動式疲労試験装置を開発した。すなわち、高速増殖炉用材料についてギガサイクルオーダも考慮に入れた適切な寿命予測および設計・保守点検時の基礎資料を提供することを目的とし、それに必要な超長寿命疲労データである材料強度情報を得るために同試験装置を製作した。本報告書では開発した試験装置の概要および仕様について報告する。

（略）

（略）

2. 超音波振動式疲労試験装置

2.1 超音波振動式疲労試験装置の原理

超音波式疲労試験装置[10–16]では、図 2.1 に示すようにコンバータ（ピエゾ素子）によって発生した 20kHz の振動が、ブースタ、ホーンで増幅されて試験片に伝わり、試験片に繰返し応力を発生させる。従来の疲労試験装置と違い超音波振動式疲労試験装置では共振を利用しているため、試験片自体の質量が反力の役目を果たしているので、試験片の片側を固定する必要がなく、試験片の変位を計測することで試験片の内部に発生する最大ひずみおよび最大応力を計算することができる[10,15,16]。

超音波振動式疲労試験装置は、固体中を伝わる縦波が共振するように振動系が構成されているため、ブースタおよびホーンはもとより試験片自身も 20kHz で共振するように設計しなければならない。すなわち、試験片を除く振動系が 20kHz で共振体としてチューニング

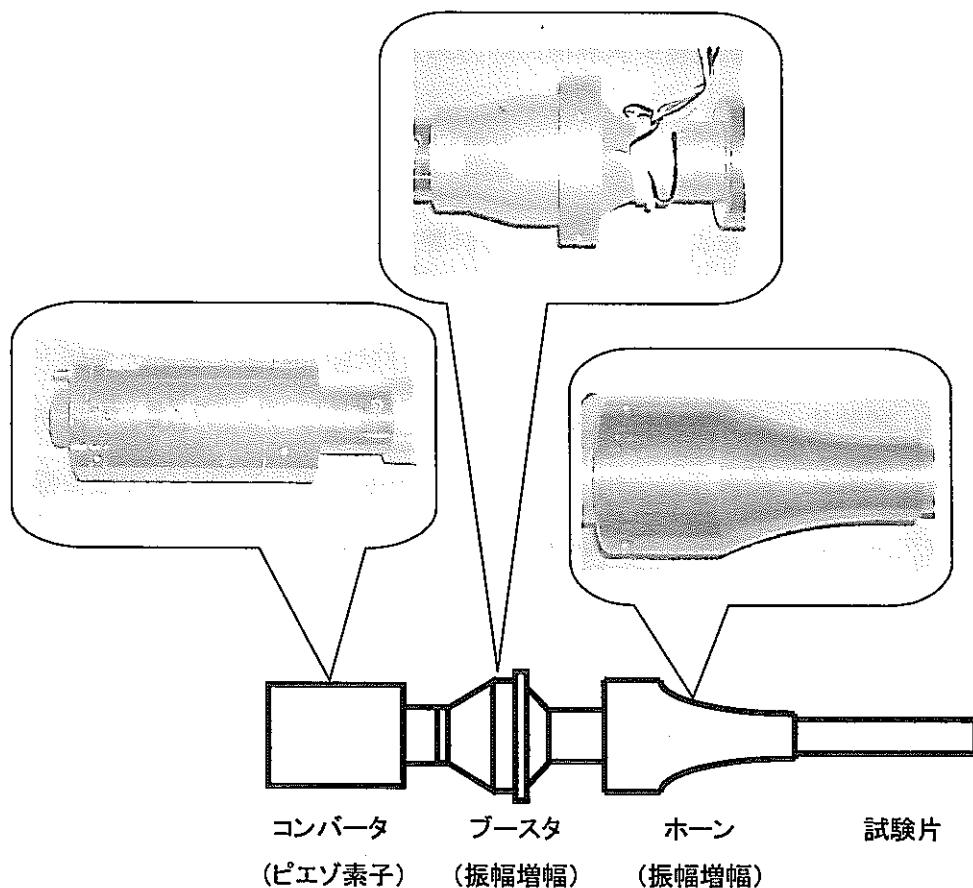


図 2.1 超音波振動式疲労試験機の動作原理

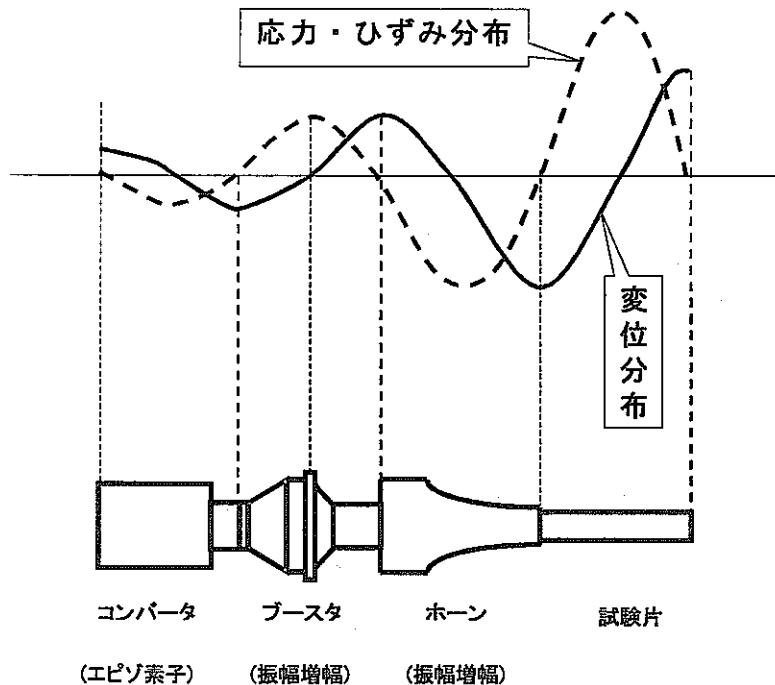


図 2.2 超音波振動式疲労試験機の応力および振動振幅の分布

グされていれば、試験片の材質および形状の変更は試験片自身が共振するように試験片を設計すればよい。

図 2.2 に共振がチューニングされたときのホーンおよび試験片に生じる応力振幅と変位振幅の概略を示す。試験片の全長方向には振動振幅が半波長分の分布となるようにチューニングされ、試験片両端部で最大変位振幅（符号は逆）が生じる。このとき変位振幅が 0 となる位置（試験片長手方向中央部）に、試験片が受ける最大応力・ひずみ振幅が発生する。

以下には、コンバータ、ブースタおよびホーンのそれぞれの役割について示す。

(1) コンバータ

コンバータは、セラミック圧電素子が主要部で、超音波 STACK の一部としてアクチュエータの内部に取り付けられる。振動発振器アンプから出た超音波電気エネルギーは、コンバータ（トランスデューサと呼ばれることがある）へ送られ、高周波電気振動をその電気振動と同じ周波数を持つ機械振動に変換される。すなわち、圧電素子に交番電圧

を加えると、素子は伸縮を繰り返して、90%以上の効率で電気エネルギーを機械エネルギーに変換する。

(2) ブースタ

超音波による組立てがうまくいくためには、ホーン表面の振幅を変えられるようにすることが重要となる。ブースタはこの振幅を変化させる装置で、比率の異なる超音波エネルギーをホーンに連結させ、ホーン表面の振幅を増減させる。これは、ブースタを半分ずつ構成している入力部と出力部の質量の比を変えることで行う。

ブースタは、アルミまたはチタンの半波長の共振体が一般に採用される。ブースタは、超音波スタックの一部としてコンバータとホーンの間に取り付けられ、スタックを固定するための固定点としての役割も持っている。

(3) ホーン

ホーンは、超音波スタックの一部としてブースタへ取り付けられ、超音波振動を試験片へ伝達させる役割をするもので、アプリケーションごとに選択あるいは設計される。一般的に、各ホーンは組み立てられるパツツへ必要な力と振動を均一に加える半波長の共振体としてチューニングされる。

ホーンは、その形状によってステップ型、コニカル型、エクスボネンシャル型、バー型、またはカテノイダル型と呼ばれ、ホーンの形状でホーン表面の振幅が決まる。そのアプリケーションに応じて、ホーンをチタン合金、アルミ、または鋼で作ることともできる。とくにチタン合金は、強度が高いことと損失が低いことからホーンには最適な材料であるといえる。アルミ製のホーンは、摩滅を減らすためにクロムメッキ、ニッケルメッキ、またはハードコートを施すのが一般的である。鋼製のホーンは、超音波インサートなど、硬さを必要とする振幅の小さなアプリケーションに使われる。

なお、本研究で開発した試験装置には、高強度で振動伝達が低損失であるチタン合金製のエクスボネンシャル型のホーンを用いている。

2.2 超音波振動式疲労試験装置の概要

表2.1および表2.2にそれぞれ開発した超音波振動式疲労試験装置の構成および主な仕様を示す。また、図2.3および図2.4に試験装置の概略とその写真を示す。本試験装置は、超音波発生装置、計測装置、高周波誘導加熱装置とそれらを計測制御するコンピュータおよびプログラムで構成されている。

試験装置の仕様は、2.1で記したように超音波発生装置によってほぼ決定されるといつてよい。本試験装置に採用した超音波発生装置は、周波数 20kHz、出力 1kW の発振器アンプを用いている。すなわち、アンプから発生した 20kHz の高周波電気振動を、コンバータでその電気振動と同じ周波数を持つ機械振動へ変換され、さらにブースタで 2 倍、ホーンで 2.5 倍に増幅され、ホーン先端に取り付けた試験片を大きい振幅で振動させることができる。

計測装置は、試験片端面の変位を計測するためのダイヤルゲージ、ブースタに生じるひずみを計測するための動ひずみ計および温度計測制御のための温度調節器がある。ダイヤルゲージにより計測され試験片端面の変位振幅から、試験片に負荷される最大応力（最大ひずみ）を有限要素法解析や計算式で求めることができる（後述）。ただし、今回の試験装置では振幅の計測はダイヤルゲージを用いた接触式を採用したが、レーザ変位計などの非接触式の高速計測センサーを用いるほうが望ましい。

動ひずみ計は、試験中の試験片に生じる最大応力のデータを連続的に収集するために設けたものである。試験片標点部に発生するひずみの計測は、直接試験片にひずみゲージを貼り付けて計測することも可能であるが、この方法ではひずみゲージ自身も繰返し振幅により剥離や破損が起こり試験途中で計測ができなくなる恐れがある上、高温の試験では計測が実際に不可能である。したがって、標点部よりひずみ振幅が小さいブースタ又はホーンに貼り付けたひずみゲージから得られるひずみ振幅と標点部でのひずみおよび試験片端面の変位振幅との校正をとり、その関係式を用いて試験中の任意なサイクルでのひずみを、試験終了後に保存されたデータから間接的に求めることができるようにした。

温度調節器は、将来的に高温下での試験も可能とするために設けた高周波誘導加熱装置の出力を、熱電対を用いて計測した温度からフィードバック制御するものである。また、常温試験の場合には、試験片の温度の監視や試験片冷却のための冷風装置の制御としても用いられる。

本試験で用いる試験片の形状は、2.1のところで述べたように、試験片自身も超音波スタ

ックの一部であることから、試験片が 20 ± 0.5 kHz で共振するように設計する必要がある。また、高周波振動により材料によっては内部発熱が顕著に見られ、試験片の温度上昇に起因するヤング率の変化によって、試験途中で共振周波数が変化し、所定の試験片振幅が得られないことがある。試験中の内部発熱による試験片温度上昇は、後述するエアによる強制空冷と超音波発振器の間欠運転（超音波振動発生の on-off 繰返し、すなわち等間隔の振動休止時間を挿入）することによってある程度回避できるという報告がある[16]。ただし、内部発熱は完全に解消することができないので、試験片の共振周波数を 20 kHz に維持するための適切な試験片冷却方法を考える必要があると考えられる。

一方、高温試験では、内部発熱で生じる温度以上で試験を行う場合には、試験片の冷却は不要となり、所定の試験温度に維持するための外部加熱装置（本研究では高周波誘導加熱装置を使用）の出力を制御すればよい。この場合、試験片からのホーンに伝わる熱を効率的に遮断するための冷却を試験片とホーンとの間で十分おこなわなければならない。

常温下での試験は、次節のところでも述べるが、一定間隔の振動休止時間挿入とともに、補助的に試験片の冷却も行うものとする。また、高温試験では、ホーンと試験片の間に 1 波長もしくは $1/2$ 波長分の冷却のためのチタン中実丸棒のダミーホーンを挿入して、その部分を冷却して、試験片からホーンへの熱を遮断することを計画している。

以上、試験装置の概要について述べたが、次節では試験片形状や試験の計測制御方法等についてもう少し詳しく述べる。

表 2.1 超音波振動式疲労試験装置の構成

項目	数	備考
超音波発生装置 コンバータ ブースタ ホーン 発信器アンプ	一式	必要に応じて一部変更有り
計測装置 変位計測器 直流型動ひずみ計 温度調節器	一式 一式 一式	ダイヤルゲージで代用 ひずみ計測（ブースタ部分） 外部加熱装置制御用
高周波誘導加熱装置	一式	10kW
プログラム	一式	言語:Visual Basic
パーソナルコンピュータ	一式	計測制御用
その他		放射温度計, 周波数カウンタ, 冷却(空冷)装置

表 2.2 超音波振動式疲労試験装置の主な仕様

項目	仕 様	備 考
試験周波数	20kHz ±0.5kHz	
ホーン端面振幅	±100μm	設計値
試験片形状	中空円筒	
試験温度	常温～600°C, 大気中	設計値(未確認)
応力比(ひずみ比)	-1	
試験応力範囲	±500MPa	設計値
出力	1kW	2又は3kWに変更可能

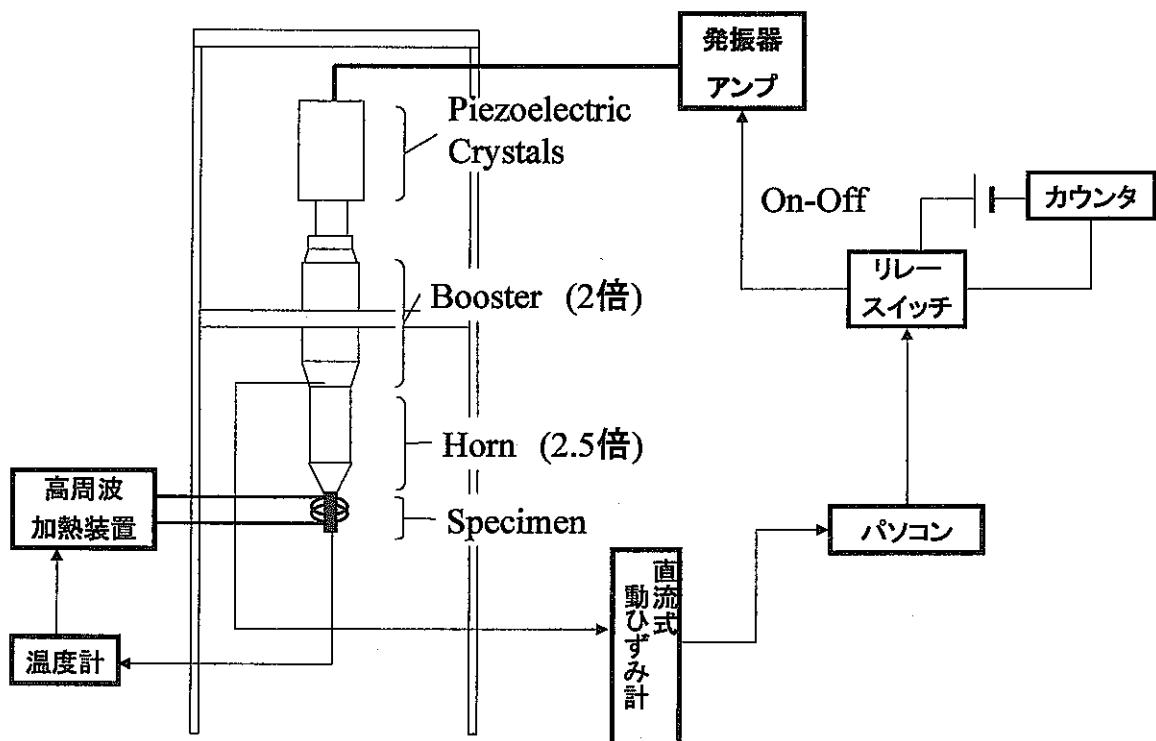


図 2.3 試験装置の概略

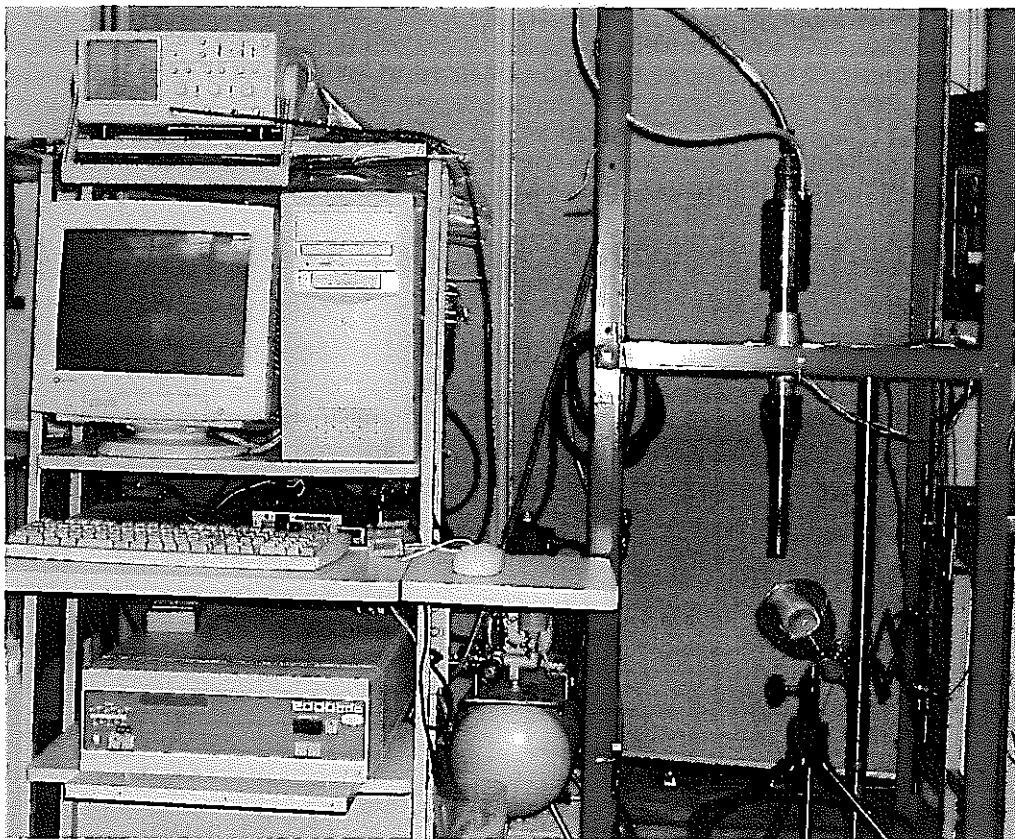


図 2.4 試験装置の概略写真

2.3 試験片

試験片の形状は、前述したように、試験片自身も共振体の一部であることから、試験片が 20 ± 0.5 kHz で共振するように決定する必要があった。試験片形状は中実および中空円筒のもので試験可能であるが、代表的なものとして図 2.5 に示すようなダンベル型およびストレート型の 2 種類が挙げられる。また、表 2.3 には 2 種類の試験片形状の特徴を表記した。

図(a)のダンベル型の試験片では、試験片に与える応力・ひずみ振幅を大きくとることができると、試験片形状・寸法の設計や試験片温度変化に伴うヤング率の変化などによる試験片形状決定のためのチューニングが煩雑になる。一方、図(b)のストレート型の試験片では、応力・ひずみ振幅の増幅がダンベル型に比べて小さくなるが、試験片のチューニングが試験片全長の長さ調整のみで可能となる。また、試験片加工も容易である。ただし、標点部の板厚が大きくなることから、内部発熱量も増加する恐れがあるので十分注意が必要である。

本研究では、対象とする材料が熱交換器などに用いられる円筒材が多いことに加えて、上述した試験片の特徴から判断して、試験片加工およびチューニングが簡単なストレート型の標点部外径および内径がそれぞれ 28mm および 24mm の円筒試験片を採用することにした。図 2.6(a)および(b)に試験片写真と試験片形状および寸法を示す。なお、試験片の全長 L は試験片自身が 20kHz で共振する長さに決定されている。すなわち、ストレート型円筒試験片を用いた場合の試験片全長 L は試験片中を伝わる縦波の半波長に等しく、次式か

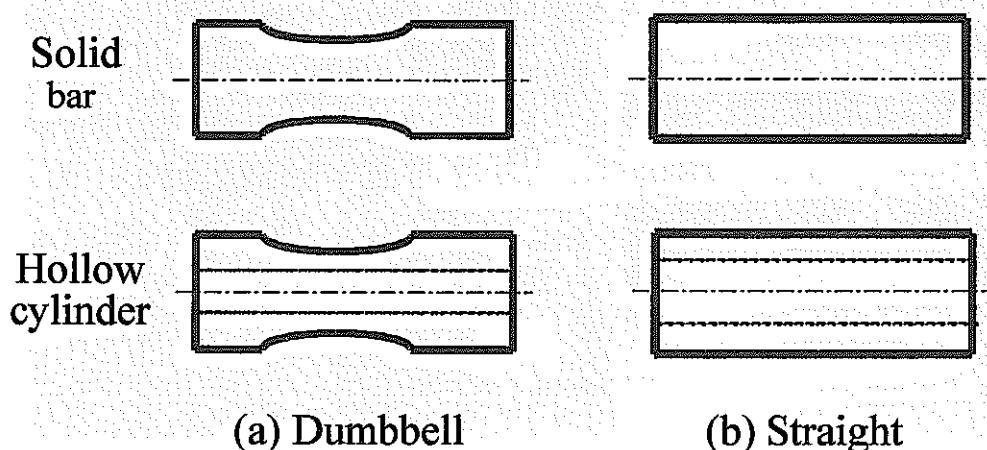


図 2.5 試験可能な試験片の形状の種類

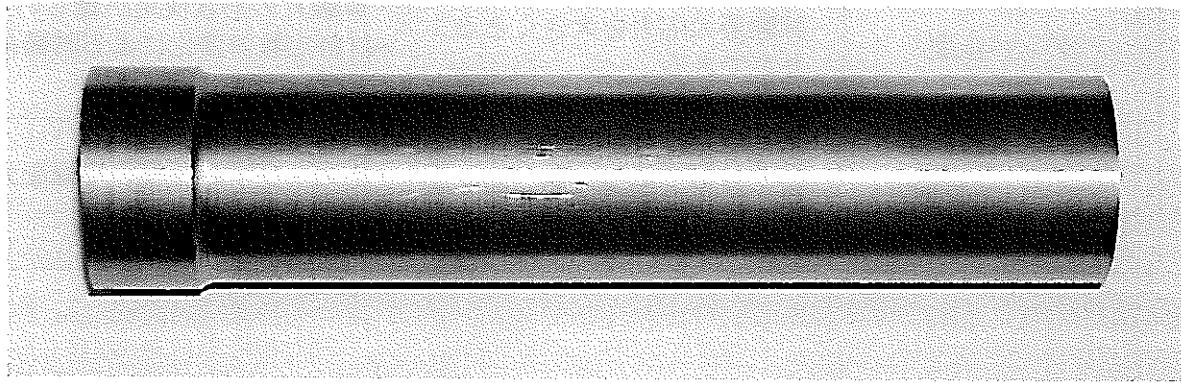
表 2.3 試験片の特徴

タイプ	長所	短所
ダンベル型	・試験最大応力を大きくとることができる	・試験片の形状決定が難しい ・材料定数の変化による試験片のチューニングが煩雑
ストレート型	・試験片のチューニングが、試験片長さの調整にみて行うことができる	・応力・ひずみ振幅の増幅を大きくとれない

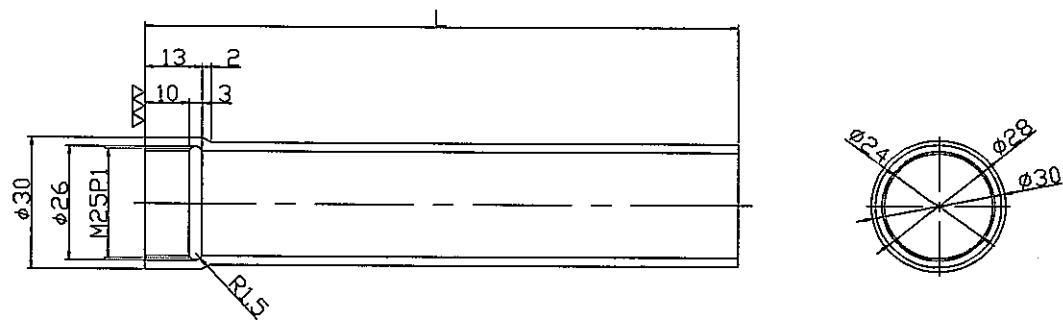
ら求めることができる。

$$L = \frac{c}{2f} = \frac{\sqrt{E/\rho}}{2f} \quad (2.1)$$

ここで、 E , ρ および c は、それぞれ試験片材料の縦弾性係数、密度および材料中を伝わる音速である。また、 f は試験周波数 (20kHz) である。例えば、縦弾性係数 200GPa および密度 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ のとき、試験片全長は約 126mm となる。ただし、より最適な条件で共振する試験片長さにするには、試験片を実際に加振させて周波数カウンタで振動周波数を計測しながら試験片長さを微調整して決定するほうが確実で望ましい。



(a) 試験片の写真



(b) 試験片形状および寸法(mm), L=135 (STBA24, 常温)

図 2.6 本研究で採用した試験片

2.4 試験方法

2.4.1 試験機計測制御方法

試験中の試験片は高速繰返しで振動するために内部摩擦による発熱が起こり、それは一般的に応力・ひずみ振幅が大きい試験ほど大きくなる。また、発熱は試験片材料の種類によっても異なるが高強度鋼では発熱量が少ないと報告もある[16]。したがって、試験片の発熱による寿命への影響を少なくするためには、何らかの方法によって試験片の発熱を抑える必要がある。本試験装置では、常温大気中での試験ではエアによる試験片標点部の空冷と振動発生の間欠運転によって回避している。エアによる冷却はどちらかといえば補助的に用いられ、間欠運転が試験片発熱を抑える主役を果たしている。間欠運転は、図 2.7 に示すように一定振幅振動を負荷する稼働時間 (t_d) と休止時間 (t_p) を適当に調節する。例えば、1秒間内で $t_d=200\text{ms}$, $t_p=800\text{ms}$ のように間欠運転を繰り返し行う。

本試験装置では、間欠運転中の発振開始 (on) 直後の発振装置の立上がりに 50ms の時間を要することから、 t_d は 50ms 以上に設定しなければならないが、 t_d が小さいと応力振幅一定試験とならないために、 t_d はあまり小さくならないようとする必要がある。また t_p の大きさはプログラムで自由に設定することができる。しかし、1 ブロック中に占める t_p の割合を大きく設定すると、試験片発熱は十分抑えることができるが、試験時間が長くなってしまうことから、発熱を効率良く回避する t_d と t_p の最適な組合せを見つける必要があ

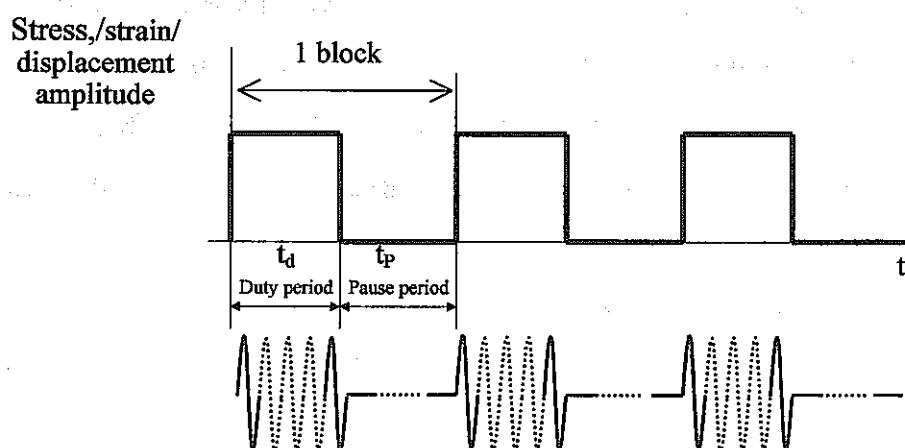


図 2.7 振動装置の on-off 制御

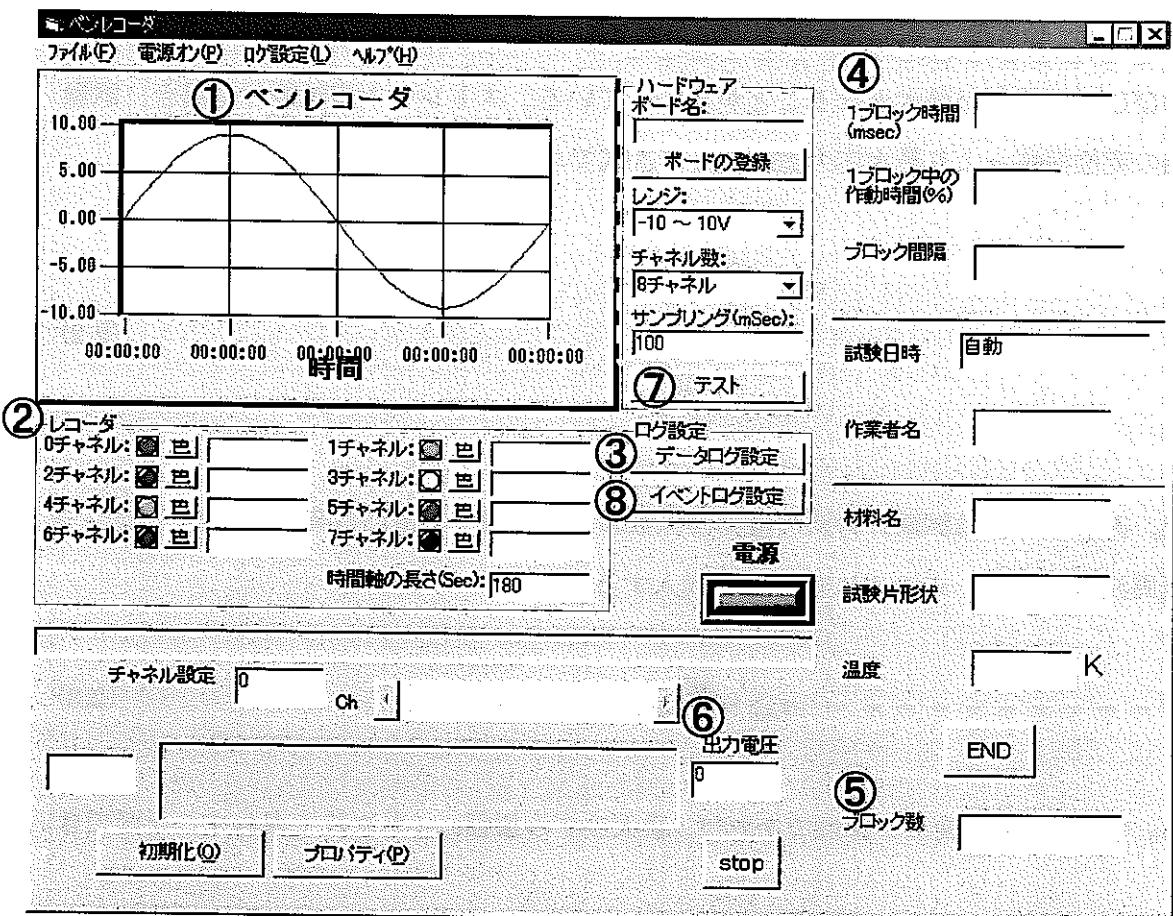
る。

試験装置の計測制御は、試験繰返し速度が 20kHz と高速であるために、高速処理を行う必要がある。それに対応するために、2.2 試験装置の概要のところで述べたように、計測制御のためのインターフェイスおよび計測器はいずれも高速処理できるものを採用している。すなわち、ひずみ（ブースタ部分）計測用のアンプは直流型の最大応答周波数 200kHz、パソコンからのデータ入出力ボードには最大変換速度 1μs (1MHz) のものを採用している。これにより、試験機制御およびデータ計測の速度は試験繰返し速度に対して十分対応できるものであると判断できる。

間欠運転の on/off はコンピュータから出力される信号 (5V 電圧) によって図 2.3 で示したリレースイッチを on/off し、アンプの振動発生を電気的にコントロールする。試験中にコンピュータに記録できるデータは現在のところはひずみ（ブースタ部分）のみであるが、試験片端の変位も電気的に計測する場合には、変位振幅の取得も可能となる。この他に、コンピュータには、試験中の装置の温度を監視する温度データおよび振動発信アンプの過負荷による異常信号が入力され、非常停止などの安全装置を作動できるようにプログラムされている。

図 2.8 は試験実行時の計測制御プログラムの設定画面である。制御プログラムの言語は Visual Basic を用いており、設定および操作は極めて簡単である。①は試験中のひずみおよび変位（オプション）を図示し、②はその数値を示す。③では記録データのファイル名入力、④は試験条件の各種設定で、データのサンプリング速度、間欠運転の時間設定および各種情報を設定する項目となっている。⑤のブロック数は間欠運転の on/off の 1 サイクルを 1 ブロックとし、試験中のそのブロック数をカウントした結果を示している。なお、ブロック数はリレースイッチの on/off から計測されるカウンタでも読み取ることができる。⑦は間欠運転のためのコンピュータから出力される電圧で、on のときは 5V が表示されている。

試験は、画面の「電源」のボタンをクリックすれば開始し、再びクリックすると停止する。また、疲労試験の終了は、試験片のき裂発生・成長により共振周波数が変化し、それが設定した範囲を超えると停止信号を検知して試験が自動的に停止する。また、そのサイクルが材料の疲労寿命としてみなされるが、そのサイクル数が従来の試験装置で実施した破断寿命との互換性についてはより多くの試験結果を基に解析が必要であり、今後の検討課題である。



番号	項目	内容説明
①	ペンレコーダ	各チャンネルから入力されている電圧を記録する
②	レコーダ	各チャンネルの入出力電圧を表示する
③	データログ設定	各チャンネルの入力電圧を記録する
④	試験条件	試験時における様々な条件を入力する
⑤	ブロック数	何ブロックまで試験を行なったかを表示する
⑥	出力電圧	出力している電圧を表示する
⑦	テスト	入力電圧のチェック
⑧	イベントログ設定	入力電圧が選定した電圧の上限・下限を超えた時の時間、電圧を記録する

図 2.8 試験計測制御設定画面

2.4.2 応力とひずみの求め方

図2.9で模式的に示すようように、試験片の先端で変位振幅が最大となり、応力振幅が0となる。また、ストレート型円筒試験では試験片先端から $1/2L$ の位置で変位が0、応力振幅およびひずみ振幅が最大となることがわかっている。ストレート型試験片の場合、試験片先端の変位振幅 a より最大応力振幅 σ_{max} が次式で求められる[10,16]。

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{\pi}{2} E \frac{4f}{c} a \\ \therefore \quad \sigma_{max} &= \frac{2\pi Ef}{c} a\end{aligned}\tag{2.2}$$

ここで、 E および c は試験片材料の縦弾性係数および材料中を伝わる音速である。また、 f は共振周波数である。式(2.2)に式(2.1)を代入すると、

$$\sigma_{max} = \frac{\pi E}{L} a\tag{2.3}$$

となる。もし、材料の変形が弾性であれば、最大ひずみ振幅 ε_{max} も次式で表わすことができる。

$$\varepsilon_{max} = \frac{\pi}{L} a\tag{2.4}$$

また、 ε_{max} および試験中の標点部のひずみ波形は、ブースタ部で計測されコンピュータに記録されるひずみデータより間接的に知ることができる。

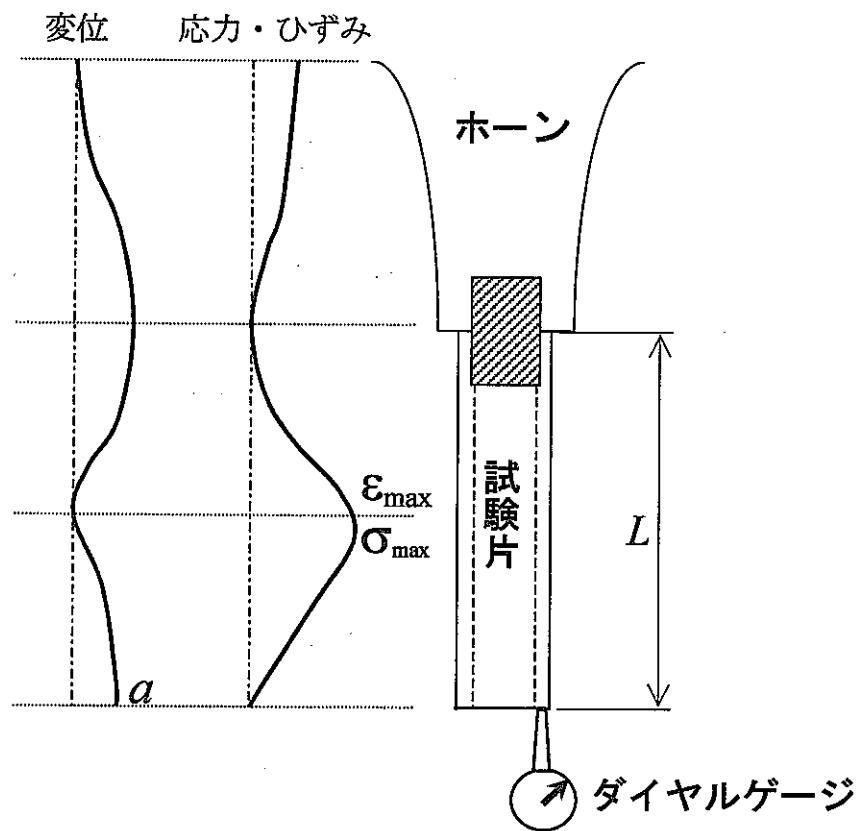


図 2.9 応力・ひずみ振幅の計測

3. 予備試験結果

本章では開発した超音波振動式疲労試験装置による常温大気中における予備試験結果について示す。試験に用いた材料は、高速増殖炉熱交換器材料である STBA24 であり、その化学成分および機械的性質を表 3.1 および表 3.2 に示す。また、試験片は外径 31.8mm、肉厚 3.8mm のパイプ材から図 2.6 に示す形状に機械加工した。なお、試験片長さ L は式(2.1)から計算すると、126mm となるが、実際に周波数カウンタで試験片のチューニングを行ったところ、最適試験片長さは 130mm であった。この試験片長さの差は、試験片をホーンに取り付けるためのネジ接続部分が、試験片の周波数特性に影響したことによるものと考えられる。

表 3.1 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	mass%
Min.	—	—	0.30	—	—	1.90	0.87	
Max.	0.15	0.50	0.60	0.030	0.03-	2.60	1.13	

表 3.2 機械的性質

Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness Rockwell (B scale)
7.84×10 ³	200	205	410	30	53

3.1 変位およびひずみ振幅

図 3.1 は試験片標点部に貼り付けたひずみゲージにより計測したひずみ振幅 ϵ_a と振動発信器アンプ出力 P との関係を示す。 ϵ_a はアンプ出力の増加に伴って増加しているが、高出力になるほど ϵ_a の増加割合は若干小さくなっているようである。これは、高振幅試験により試験材料の内部発熱が顕著に現れ、材料特性の変化による試験片の共振周波数が減少したことに起因して、試験片の振動特性が変化したためであると考えられる。また、アンプ出力が 70%以上の試験では、試験装置の共振周波数が許容範囲以上 ($\pm 0.5\text{kHz}$) に変化したために、加振ができなかった。しかし、試験可能な範囲は試験片に負荷される最大ひずみ

み振幅値で約 800μ , 応力振幅に換算すると 160MPa に相当する。これを発電用原子力設備規格設計・建設規格の設計疲労線図[17]に当てはめると、推定される疲労寿命は約 10^6 サイクルとなる。したがって、本試験装置によりギガサイクルオーダでの超長寿命疲労試験が

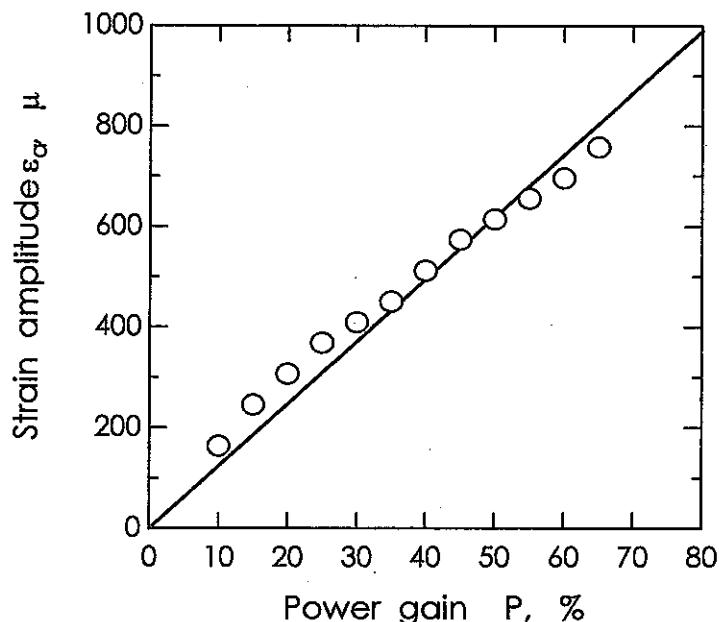


図 3.1 標点部でのひずみ振幅と振動発信器アンプ出力との関係

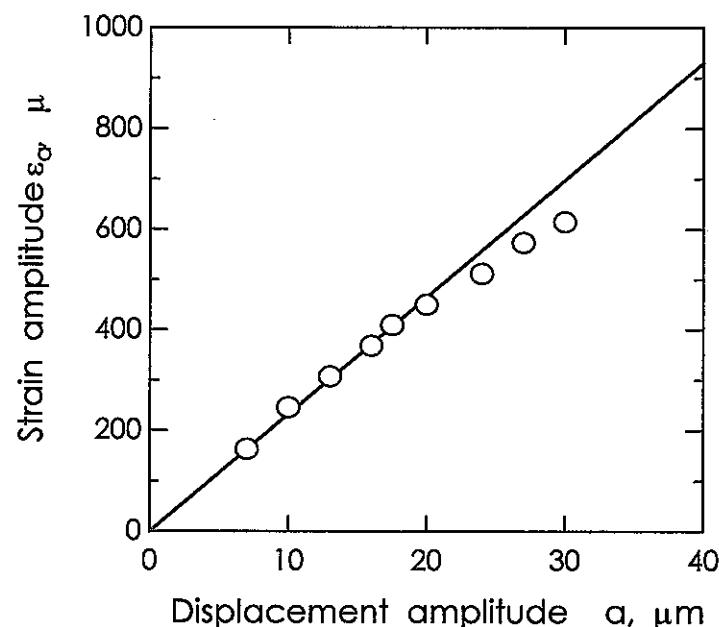
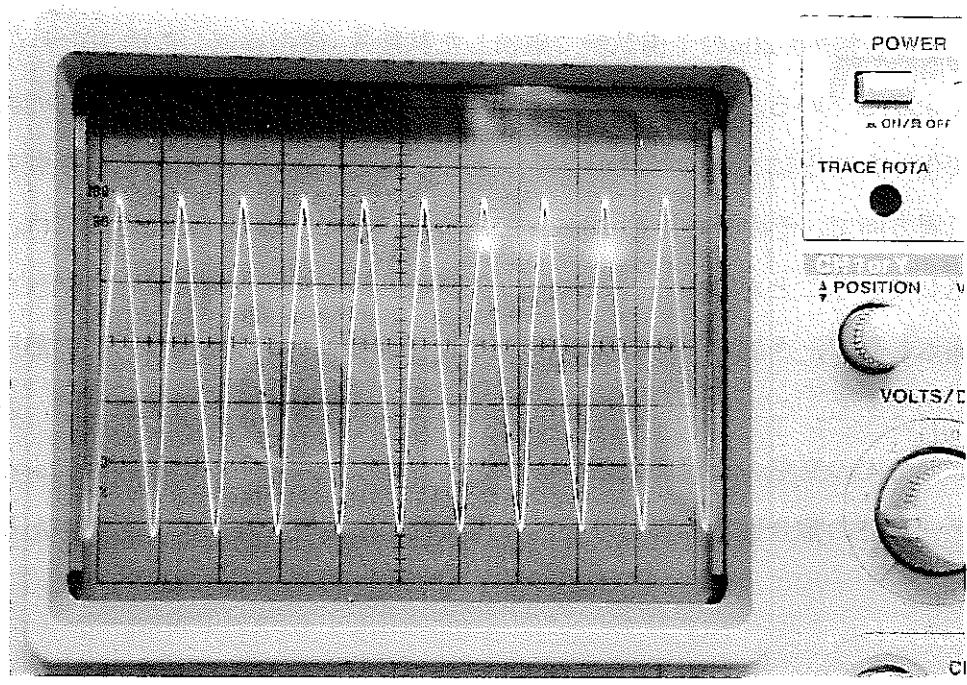


図 3.2 標点部でのひずみ振幅と試験片端の変位振幅との関係

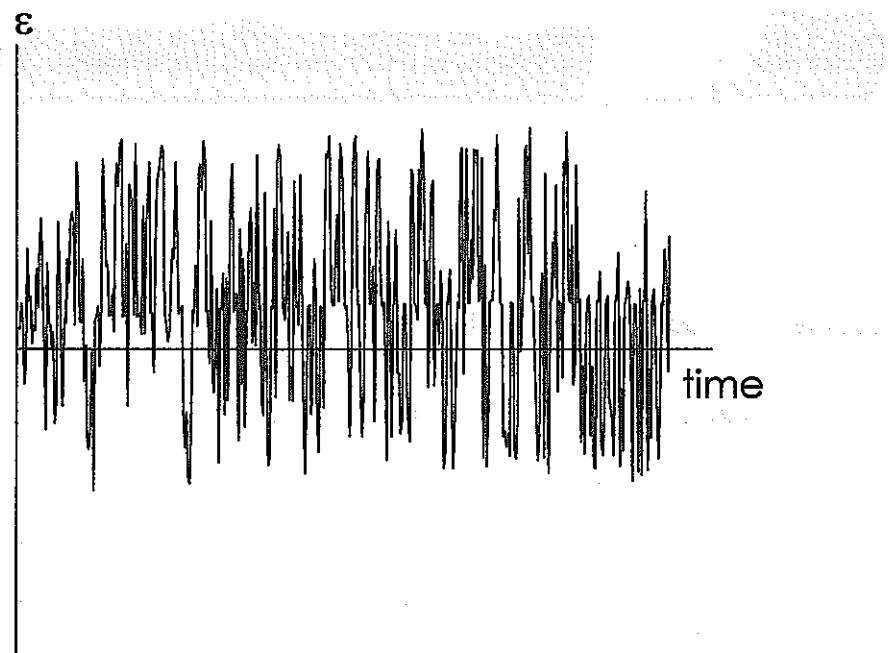
十分可能であることを示唆している。ただし、従来の試験装置と超音波振動式疲労試験装置とで得られた試験データの連続性および互換性を確かめるためには、試験可能な応力およびひずみ振幅レベルの最大値にもう少し余裕が必要であるものと判断できる。これについてはアンプ最大出力を 2 又は 3kW に変更することにより解決できるものと考えられる。

図 3.2 は ϵ_a と試験片端で計測した変位振幅 a との関係を示した結果である。同図の結果では、高応力レベルでデータのばらつきが若干見られるものの、ほぼ正比例の関係で表すことができる。また、直線の傾きは約 23m^{-1} であり、式(2.4)のひずみ振幅と変位振幅との関係式の直線の傾き $\pi/L = 24.2 \text{ m}^{-1}$ ($L = 130\text{mm}$) とほぼ一致していた。すなわち、試験中の試験片標点部に発生するひずみ振幅は、ダイヤルゲージによる試験片端の変位を計測することによって十分高い精度で求められることがわかった。

図 3.3 は発信器アンプ出力 40% で実施した試験中での、試験片標点部のひずみ波形を示す。同図(a)は動ひずみ計アンプから直接オシロスコープで計測したものであり、図(b)は計測制御プログラムでデータを A/D 変換器を介してコンピュータに保存した後グラフ化した結果である。オシロスコープで計測した結果から、試験中のひずみ波形は設定された通りの正弦波であることが確認できた。一方、A/D 変換器を介して計測したひずみ波形はオシロスコープで計測された結果とは異なり、ランダムに変動したひずみ波形となっている。これは、A/D 変換器の変換処理速度の限界からひずみデータを正弦波で図示できるだけのデータ数を 1 サイクル中に取得できなかったことが原因している。しかし、図(b)のひずみ波形の最大および最小値から、試験中のひずみ振幅を求めることができる。



(a) オシロスコープ上でのひずみ波形



(b) コンピュータに記録されたひずみ波形

図 3.3 実験中の標点部でのひずみ波形

3.2 破損試験片

図 3.4 はひずみ振幅約 620μ の予備試験で破損した試験片（破損繰返し数約 10^7 サイクル）のき裂の様子を示している。このき裂は、き裂の発生および成長により、試験片の共振周波数特性が変化したことによって試験が自動停止した繰返し数のものである。き裂の方向は試験片の円周方向で、その長さは約 20mm であった。また、観察されたき裂には、き裂に沿って変色していることがわかる。これは、き裂発生からき裂成長によって試験が自動停止までの繰返し数で、き裂のある部分が振動により通常より多く発熱し、その熱による酸化によるものである。このように、超音波振動式疲労試験装置による試験では、寿命に及ぼすき裂部部分での発熱の影響や破損寿命の定義方法など、従来の試験装置による疲労試験の寿命データとの整合性との係わりで、今後系統的に調査・検討する必要があるものと考えられる。

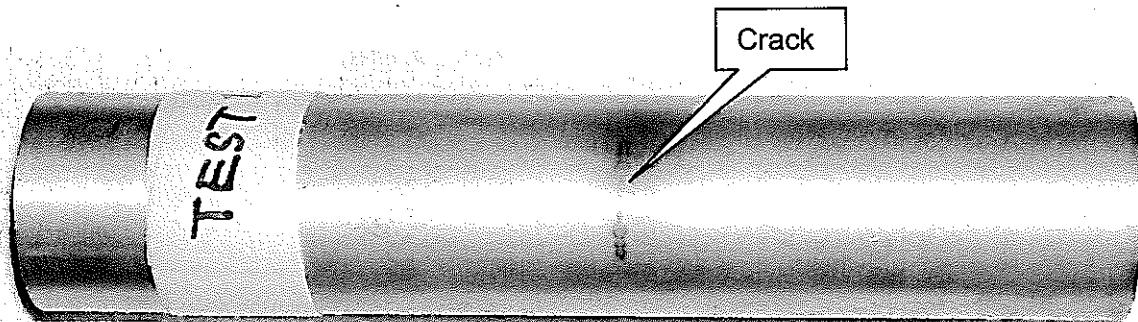


図 3.4 破損した試験片写真

3.3 間欠試験による試験片の温度上昇

図 3.5 に間欠試験中の試験片の温度上昇を調べた結果を示す。1 ブロックの時間を 1, 3 および 5 秒間一定とし、稼動時間 (t_d) を変化させた。また、1 ブロックの時間が 1 秒間の試験では、エア冷却をした場合についても調べた。エア冷却なしの結果では、いずれのブロック時間の結果でも、温度上昇は t_d の増加に伴って 2 次関数的に増加した。 t_d が小さいときの温度上昇はブロック時間の小さい試験ほど大きいが、いずれの場合でも常温での試験実施が可能な温度上昇範囲内であると判断できる。一方、エア冷却を行った結果では、 t_d が小さいときにはエア冷却を行わない場合の温度上昇量とほとんど変わらないが、 t_d の増

加に伴ってその差は顕著に見られた。すなわち、常温大気中での試験では、試験片内部発熱による試験片温度上昇をエア冷却および間欠運転により十分抑えることが可能であることがわかった。なお、間欠運転試験における試験片の温度上昇、ブロック時間および稼働時間との関係は、もっと多くの条件での試験を実施し、効率的な試験を行うための最適な条件を見つけ出す必要がある。

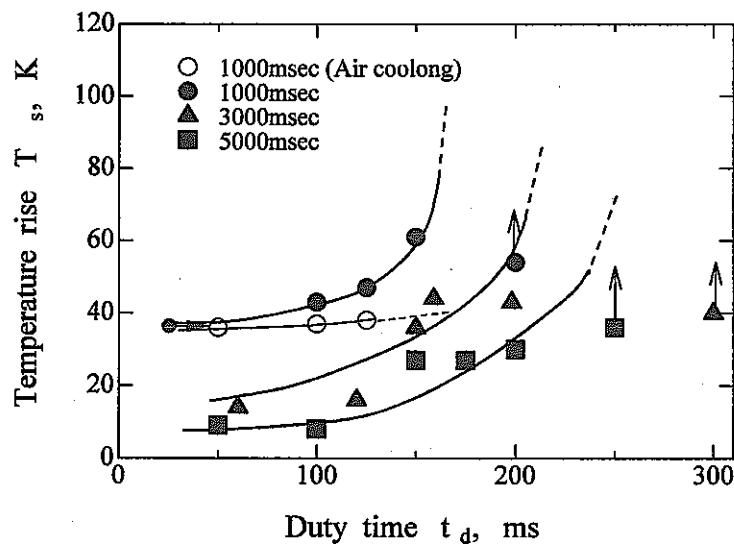


図 3.5 間欠運転における試験片温度上昇

3.4 まとめ

高速増殖炉熱交換器用材料を対象にギガサイクルでの疲労試験を行うための超音波振動式疲労試験装置を開発した。本試験装置は、超長寿命疲労の加速試験を実施するための十分な性能であることが確かめられた。ただし、本装置で得られた試験データと従来の試験装置で実施した疲労寿命データとの連続性や互換性および超長寿命疲労試験を効率的に行う上での最適試験条件などについて、様々な条件下で実施したデータを基にさらに検討が必要である。

4. 今後の展開

今後の研究の展開として、開発した試験装置により、高速増殖炉構造材に関して疲労試験を実施し、超長寿命疲労強度特性を明らかにするとともに、環境・応力振幅が疲労強度に与える影響についての検討を進めていく。まず、常温の単一環境条件下で熱交換器用材料（2.25Cr-1Mo鋼）を対象とした超長寿命疲労試験を実施し、これらで得られた試験結果から、開発した試験装置の超長寿命試験データの有効性を確認する。具体的には、超音波振動式疲労試験装置および電気油圧サーボ式疲労試験装置で実施した両試験寿命データの連続性が保証できるかどうかの検討を行う。また、一般に同一試験装置による実証可能な領域は限られており、その適用性を考慮する場合にはデータ外挿が必要となるが、破壊メカニズムが同一であると外挿に妥当性を与える。このためには、破壊起点を異にする破壊メカニズムの解明も行う必要があるものと考えられる。破壊メカニズムの研究は、金属物性的な研究と破壊力学的な研究があるが、さしあたり本研究では金属物性学的アプローチとして疲労過程中に生じる物理量の変化過程の検出（塑性ひずみ、AE等の変化）や光学顕微鏡と電子顕微鏡による観察に基づく破壊起点の物理的モデル化による予測評価式の策定を行う。また、研究過程で必要となれば破壊力学的見地からのアプローチとして、有限要素法解析（FEM）を用いて材料試験片の応力解析を実施することにより、結晶粒オーダーの破損の開始から進展を模擬した評価予測法も検討する。

その後の展開研究として、開発した超音波振動式超長寿命疲労試験装置を改造し、高温下での試験（試験装置の仕様として最高温度 600°Cを予定）を可能にする。さらに、予備試験の実施と試験装置の不具合の改良後、高温下での試験で得られた結果の分析・解析を通して超長寿命域での高速増殖炉用材料の寿命特性を明らかにし、もんじゅプラントの健全性確保の参考となる強度評価用設計疲労強度曲線を提供する。

さらに、継続・応用研究として、さらに実機に近い環境下での試験が行えるように高温・高圧もしくは腐食環境下で試験実施を試み、その可能性を調べる。高圧下での試験では試験層の設計が大きなポイントとなり、それがクリアースすれば高温試験同様に研究を進めていく。

参考文献

1. C. Bathias and J.G. Ni, ASTM STP-1211, (1993), pp.141-152.
2. T.Y. Wu, G. Jago, J. Bechat and C. Bathias, Engng. Fract. Mech., Vol.54, (1996), pp.891-895.
3. 日本機械学会: RC130 高サイクル疲労に関する調査研究会分科会研究報告書, (1996).
4. 金澤健二, 西島敏, 材料, Vol.46, (1997), pp.1396-1401.
5. C. Bathias, K.E. Alami and T.Y. Wu, Engng. Fract. Mech., Vol.56, (1997), pp.255-264.
6. 日本高圧力技術協会: 高強度鋼の疲労破壊に関する調査, (1998).
7. 中村孝, 金子真, 野口徹, 神保勝久, 日本機械学会論文集, Vol.64, (1998), pp.1820-1825.
8. 越智保雄, 日本材料学会第48期学術講演会論文集, (1999), pp.1-5.
9. Q.Y. Wang, J.Y. Berard, S. Rathery and C. Bathias, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.22 (1999), pp. 637-677.
10. 江原隆一郎, 山田義和, 後藤明, 津島稔, 材料試験技術, Vol.26, (1981), pp.177-181.
11. T.Y. Wu, J.G. Ni and C. Bathias, ASTM STP-1231, (1993), pp.598-607.
12. Q.Y. Wang, J.Y. Berard, A. Dubarre, G. Baudry, S. Rathery and C. Bathias, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.22 (1999), pp. 667-672.
13. 安部孝行, 竹内悦男, 大村孝仁, 松岡三郎, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, No.99-16, (1993), pp.589-590.
14. 石井仁, 山中一史, 東郷敬一郎, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, No.99-16, (1993), pp.591-592.
15. 中村孝, 材料試験技術, Vol.46, (2001), pp.15-25.
16. H. Ishii, K. Yamanaka and K. Tohgo, Materials Science Research International, Special Technical Publication-1, (2001), pp.59-63.
17. 日本機械学会: 発電用原子力設備規格 設計・建設規格, JSME S MC1-2001, (2001) 付録図表 8-1.