

機関番号：82108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760089

研究課題名(和文) 1000℃まで試験できる高温用超音波疲労試験機の開発

研究課題名(英文) Development of an ultrasonic fatigue testing machine at high temperature up to 1000℃

研究代表者

古谷 佳之 (FURUYA YOSHIYUKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性センター・主幹研究員

研究者番号：60354255

研究成果の概要(和文)：

1000℃まで試験できる高温用超音波疲労試験機の開発を行った。高温で超音波疲労試験を行う際にはヤング率の温度依存性やホーンの設計等が問題となるが、本研究ではこれらの問題解決に成功し、試験機の妥当性を確認することができた。より具体的には、ボイラー用の耐熱鋼とタービンブレード用のNi基単結晶合金についてそれぞれ650℃と1000℃で超音波疲労試験を実施した結果、比較データ(通常の疲労試験結果)とよく一致する結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：

An ultrasonic fatigue testing machine for high temperature fatigue tests was developed. This machine can be operated up to 1000℃. In carrying out high temperature ultrasonic fatigue testing, careful attention must be paid to temperature effects on elastic modulus, horn design and so on. In this study, all of these problems were solved and validity of the developed machine was confirmed. More specifically, ultrasonic fatigue tests were conducted on heat resistance steel for boiler at 650℃ and on Ni-base single crystal superalloy for turbine blade at 1000℃. As the result, the ultrasonic fatigue testing show good agreements with conventional fatigue testing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：疲労、ギガサイクル疲労、超音波疲労試験、高温

## 1. 研究開始当初の背景

各種タービンでは、kHz オーダの高速振動により繰返し数が  $10^7$  回を超える超高サイクル疲労が問題となる[文献：志賀、機械学会論文集 A、36-287(1970)、p.1083]。近年の解析技術の進歩により振動状態の解明は進んでいるが、他方でこれらの知見を設計に活か

すためには超高サイクル域まで特性を求めた疲労試験データが必要である。ところが、超高サイクル域までの疲労試験は膨大な時間を必要とするため、疲労試験データの蓄積は進んでいないのが現状であった。

それに対して、研究代表者らは繰返し速度が20kHz という通常の試験より200倍以上

速い超音波疲労試験の研究に取り組んできた。20kHzの超音波疲労試験では、 $10^9$ 回（ギガサイクル）まで1日で到達できるため、超高サイクル域までの疲労試験に極めて有効である。このような加速試験を行う上では繰返し速度の影響が重要となるが、研究代表者らは通常の100Hzでの疲労試験結果と20kHz超音波疲労試験の結果を比較することにより、妥当性の実証と適用範囲の明確化を行ってきた[文献：Furuya et al., Scripta materialia, 46(2002), p.157]。これらの研究を通して、研究代表者は超音波疲労試験の技術を豊富に蓄積していた。

研究動向に関しては、500°C程度までの温度域に着目すれば、国内外の双方で研究例が報告されていた。しかし、1000°Cまでの温度域に着目すると、ヤング率の温度依存性等の問題が顕著となるため、研究例は極めて少なかった。研究開始当初の時点で、1000°Cでの超音波疲労試験を唯一報告していたのは米国のミシガン大学の研究グループであったが[文献：Yi et al., Mater. Sci. Eng., 443(2007), p.142]、試験結果の妥当性を実証するまでには至っていなかった。従って、試験結果の妥当性の実証が本研究のキーポイントであった。すなわち、妥当性の実証まで成された試験機を完成させれば、世界で初めての研究成果となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまで蓄積した超音波疲労試験技術を活用し、タービンの超高サイクル疲労の問題を解決するために、高温環境で試験可能な超音波疲労試験機の開発を行った。その際には、高速振動を模擬した試験としてだけでなく、通常の疲労試験の加速疲労試験としての適用の可否についても検討を行った。また、タービンの中でも最も高温となるジェットエンジンのタービンブレードまでを範疇に収めるために、試験可能上限温度の目標を1000°Cに設定した。

## 3. 研究の方法

本研究は2ヶ年の計画とし、平成21年度に試験機の作製、平成22年度に妥当性の検証を行った。基本的な試験機の作製手順は、既存の超音波疲労試験装置に高周波誘導加熱装置を追加するというものであるが、高温にした場合に生じる種々の問題を解決するために既存装置の改造が必要であった。具体的には、(1)ヤング率の温度依存性の問題を解決するための制御ソフトの開発、(2)高温に耐え得る耐熱ホーンの開発、(3)高温状態での端面変位の測定方法の開発を行った。

また、妥当性の検証に際しては、ボイラー用耐熱鋼である12Cr-2W鋼とタービン材で

あるNi基単結晶合金について疲労試験を行った。最終目標は後者であるが、Ni基単結晶合金は素材が貴重である上、比較データも少ない。そのため、素材と比較データが豊富な12Cr-2W鋼を用いた試験を先に行い、試験手順の確立と課題の抽出・解決を行った。

## 4. 研究成果

図1に開発した装置の構成を示す。ベースとなる試験機は市販の超音波疲労試験機で、平均応力を付与する機構を備えたものである。この試験機に高周波加熱器を追加し、試験片の加熱を行うが、試験片温度の測定及び制御は2色式の放射温度計を用いて行った。その際、放射率を安定させるため、試験片の測温部には部分的に耐熱性の黒体塗料を塗布した。また、3.で述べた問題点については、以下のような解決策を講じた。

### (1) ヤング率の温度依存性の問題

超音波疲労試験では端面変位を制御して試験片に任意の応力振幅を発生させるため、応力条件を決定するためには振動方程式を求解し、端面変位と応力振幅の相関を求める必要がある。通常室温での試験の場合にはヤング率は定数であるため、振動方程式は解析的に解くことができる。市販の超音波疲労試験装置にはこのような解析解が組込まれている。ところが、温度が上昇するとヤング率は低下する。図1のような装置構成では試験片に温度分布が生じるため、ヤング率も試験片中で一定ではなくなる。この場合、振動方程式は解析的に解くことが出来なくなり、市販の制御ソフトでは応力条件の設定ができなくなる。そこで本研究では、ルンゲークッタの公式を用いて数値的に振動方程式を解く機能を備えた制御ソフトを独自に作製した。また、このような計算を行うためには温度とヤング率の相関が既知である必要があるが、高温でのヤング率の測定は高い技術が必要な上、公開されている文献データも非常に少ない。そこで、超音波疲労試験機により測定した共振周波数から、逆計算によりヤング率と温度の相関を求める機能を具備させた。すなわち、温度とヤング率の相関を事前に求めることは困難な作業であるが、本研究ではそのような作業が不要な装置の開発に成功した。

### (2) 耐熱ホーンの開発

1000°Cでの試験を行う場合、ホーン先端の温度は600~700°Cになる。そのため、ホーンには耐熱性が求められると同時に、振動子を保護するための断熱性も求められる。断熱を行う際には通常は治具の水冷が有効であるが、超音波疲労試験の場合には振動により治具が破損する可能性がある。すなわち、水冷は漏水事故に繋がる恐れがある。そこで、本研究では、耐熱性の素材で作製した丸棒形状

の治具（ロッド）を試験片とホーンの間に入  
入することでこれらの問題解決を図った。共  
振周波数が標準の20kHzとなるようにロッド  
を設計した場合、ロッドの長さは120mm程  
度となる。このようなロッドを挿入すると、  
ロッドの試験片に接する側の端面が600～  
700℃程度となっても、ホーンに接する他  
方の端面は100℃未満となる。すなわち、  
水冷することなく、十分な断熱性を確保で  
きる。このように、本研究では水冷機構を  
設けることなく、ホーンの耐熱性の問題を  
解決することに成功した。

### (3) 端面変位の測定方法の開発

通常端面変位の測定は静電容量式の変  
位計（ギャップセンサー）を用いる。ところ  
が、静電容量式の変位計では測定面との距  
離（ワーキングディスタンス）が短いため、  
測定面が高温の場合には用いることが出来  
ない。それに対して、本研究ではレーザード  
ップラー方式の変位計を用いることでこの  
問題を解決した。レーザードップラー方式  
の変位計はワーキングディスタンスを長く  
することができるため、測定面が高温でも  
十分な精度で端面変位を測定することが  
できる。また、レーザードップラー方式の  
変位計を用いて斜め方向から端面変位を  
測定する技術の開発にも成功し、試験中の  
端面変位のモニタリングも可能となった。

このようにして作製した装置を用いて行  
った実験の結果を図2、3に示す。図2は  
12Cr-2W鋼について650℃で行った疲労  
試験の結果である。超音波疲労試験の際  
には試験片の温度上昇が認められたが、  
間欠試験の適用と温度制御パラメータの  
最適化により、温度の変動幅を規格で定  
められている±5℃以内に収めることが  
できた。図2では、比較データ[文献：  
Kobayashi et al., J. Mater. Sci.,  
39 (2004), p. 6253]に対して超音波  
疲労試験結果はやや長寿命側となっている  
が、差は非常に小さい。次に、図3はNi  
基単結晶合金について1000℃で行った  
疲労試験結果である。この場合も温度の  
変動幅は±5℃以内である。データ数は  
少ないものの、超音波疲労試験結果は  
比較データ[文献：Muto et al.,  
Proc. 27th Fatigue Symposium, 27(2004),  
p. 185]とよく一致する傾向を示してい  
る。このように、本研究で開発した超音  
波疲労試験機による結果は比較データと  
よい一致を示しているため、信頼できる  
結果が得られていると判断できる。

以上のように、本研究では1000℃まで  
試験できる高温用超音波疲労試験装置の  
開発に成功した。図2、3のように信頼性  
が実証された装置の開発に成功した事例は、  
研究終了時においても世界で初めてであ  
る。



図1 開発した装置の構成

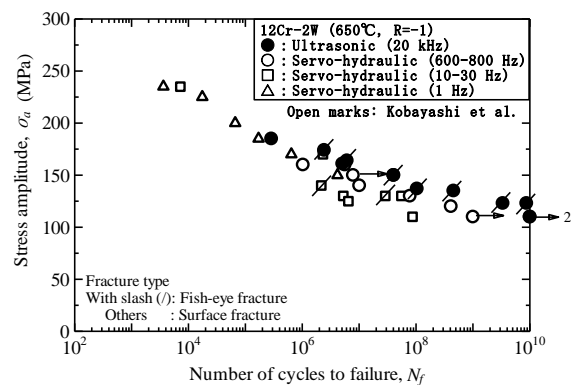


図2 12Cr - 2W 鋼の結果

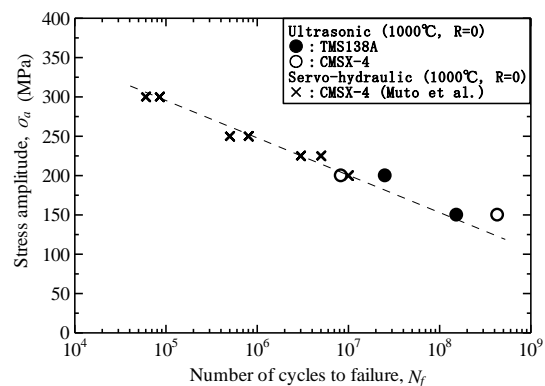


図3 Ni 基単結晶合金の結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：高温条件下での超音波疲労試験法及び試験装置

発明者：古谷佳之

権利者：独立行政法人物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2011-029557

出願年月日：2011 年 2 月 15 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古谷 佳之 (FURUYA YOSHIYUKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信

頼性センター・主幹研究員

研究者番号：60354255

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし