

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05973

研究課題名(和文) 微小素材試験片を用いた火力発電プラントの高温多軸クリープ余寿命評価法の開発

研究課題名(英文) Development of Multiaxial Creep Life Evaluation Method with Small Size Specimen for Thermal Power Plant Designing

研究代表者

旭吉 雅健(Hiyoshi, Noritake)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：30342489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：火力発電プラントのボイラー配管や航空エンジンのタービン動翼等に代表される高温構造機器では、その健全性保証のために多軸応力状態でのクリープ損傷評価が要求される。この問題解決のために、本研究課題では、新たな高温多軸クリープ実験手法を確立した。とくに、材料評価実験分野においては、評価対象材料寸法の小型化がその精度向上に有効であることから、微小素材試験片を使用することに挑戦した。一辺が50mmの十字型形状試験片を設計し、さらに同試験片用の実験装置も開発して高温多軸クリープ実験技術を確立した。高温電気炉内の試験片の変形の様子やひずみを、光学カメラを用いて非接触式で計測できることが大きな特長である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気の安定供給には火力発電の効果的な併用が不可欠である。また、航空需要の増大に伴い航空機の安全保障も不可欠である。すべての高温産業機器は、高温環境のためにクリープ現象によって材料変形を生じる。本研究課題では実機材料のクリープ損傷の程度を実験検証で高精度に評価できる手法を開発した。また、電気炉内の材料の変形をその場観察する技術も開発し、これまで未解明だった高温中での金属変形を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A creep damage evaluation under multiaxial stress conditions is required to ensure the integrity of high-temperature structural components such as boiler pipes of thermal power plants and turbine blades of aircraft engines.

In order to solve these issues, a new method of high-temperature multiaxial creep experiments is established in this work.

Particularly in the field of material evaluation and testing, we challenged the use of small size specimens because the miniaturization of the material size to be evaluated is effective in improving its accuracy. A cruciform specimen, which has 50 mm x 50 mm size was designed, and a testing system was developed for this specimen to establish a high-temperature multiaxial creep testing. A major feature of this system is that the deformation and strain of a specimen in a high-temperature electric furnace can be measured by a non-contact investigation system using an optical camera.

研究分野：材料強度

キーワード：多軸 クリープ 寿命評価 実験力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力エネルギーの安定供給は、産業活動のみならず一般生活においても重要な課題である。既存の火力発電プラントを有効活用するために、当初の設計寿命を超える状態での使用が要求されることも避けられず、的確な余寿命評価(診断)と経年劣化対策が急務である。火力発電プラント等の方が一事故は、環境汚染のみならず人間の死活にも係わる重大な事案であり、高温構造機器の健全性保障や適切な寿命評価技術の確立が重要である。

高温構造機器の余寿命評価と経年劣化対策のひとつとして、実機ボイラー配管から切出して採取した素材に一定荷重を負荷する「クリープ」試験が行われる。融点の2分の1以上の高温環境では、小さな荷重であってもクリープ現象によって破断に至る危険性を考慮すべきである。また、とくに、「多軸応力」条件下での検証が不可欠である。高温構造機器は数多くの部品や形状が不連続となる配管等で構成されていることと、熱応力と機械的応力との組合せによって多軸応力状態になることが知られている。

現在、一般的には、丸棒形状の試験片(サンプル)を引っ張る、いわゆる単軸応力状態での試験が、その容易さから採用されているが、その丸棒試験片では、多軸応力状態となる実機を正確に模擬できず、余寿命評価の精度が劣る問題点が指摘されている。多軸応力では単軸応力と異なるひずみ拘束状態であったり、結晶粒界でのボイドの発生状況が異なることから、実機状態を単軸の実験結果を用いて評価することの限界の検証も重要課題である。

2. 研究の目的

多軸応力状態でのクリープ試験手法はいくつか提案されており、その一例を以下に挙げる。

- I. 丸棒試験片を引張・ねじる方法、中空丸棒試験片に内外圧を負荷しながら引っ張る方法
- II. 十字型形状の試験片の二軸方向に荷重を負荷する方法
- III. 環状切欠き試験片を引っ張る方法

中でもIIの方法は、二つの引張力の組合せを変えることによって模擬できる応力状態が多岐に渡るメリットを有している。

さらに、クリープ試験に供する素材の寸法は小さい方が良い。十字型試験片は、現在は、一辺が200 mm程度の寸法であるため、その寸法以上の大型素材の準備が必要である。試験片の小型化によって、任意の局所位置の素材採取が可能となることと、十字型の試験片形状によって多軸応力試験が可能となることから余寿命評価の精度が向上する。本課題では、高温多軸応力のクリープ試験を、従来に比べて小寸法素材で実現し、余寿命評価の精度を飛躍的に向上させることを目的とした。

3. 研究の方法

小型十字型試験片に関する規格や先行研究、および小型十字型試験片用の試験装置が市場には存在しないために、以下の段階的課題を設定して、その解決に取り組んだ。

Step1: 小型十字型試験片の形状寸法を決定する。有限要素法シミュレーションおよび基礎要素試験を経て、全体寸法が50 mm×50 mm程度で所望の標点部応力分布を有する小型十字型試験片を設計開発する。

Step2: 小型十字型試験片に精度良く荷重を負荷する機構を要素試験によって検討する。荷重の負荷軸が移動しない機構や、試験装置の小型化を達成する機構を考案し試作する。

Step3: 卓上型高温多軸クリープ試験装置を設計開発する。高温環境で数10~200 MPaの多軸クリープ試験が可能な卓上型試験装置を開発する。

4. 研究成果

(1) 開発した小型十字型試験片

試験片サイズの小型化は多くの利点を有する反面、微細な機械加工が困難であったり、試験時の作業取扱い性が悪くなったりすることも考えられた。それらを総合的に考慮して小型十字型試験片の一辺の長さは50 mmと設定して、試行錯誤的な数値解析を経て形状および寸法の詳細を決定した。機械加工の技術検討もを経て、最終的に決定した小型十字型試験片の形状および寸法を図1に示す。さらに、実際に機械加工した試験片の外観写真を図2に示す。一辺が50 mmの試験片中央には5 mm×5 mmで板厚1 mmの標点部を有している。

形状および寸法の決定までの過程は以下のとおりである。一般に、構造物や試験片に生じる応力は荷重を断面積で除して求めるが、十字型形状試験片では断面積が定義できない。したがって、十字型試験片の応力やその分布は数値解析で求めざるを得ない。本研究課題では、試験片設計に有限要素法を用いた。試験片形状と負荷条件の対称性を考慮して、解析対象の8分の1部分を解析モデルとした。解析には汎用解析ソフト MSC 社

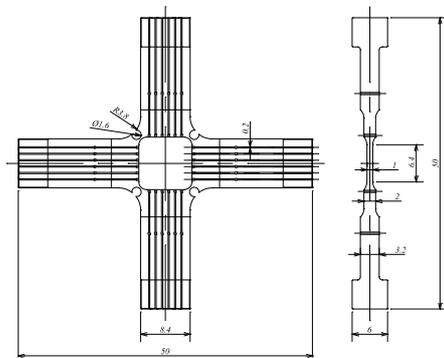


図1 小型十字型試験片の形状および寸法 (mm)



図2 機械加工した小型十字型試験片

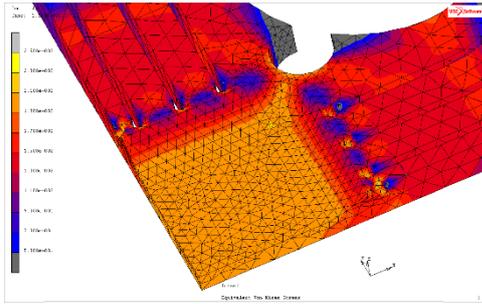


図3 応力分布の解析例

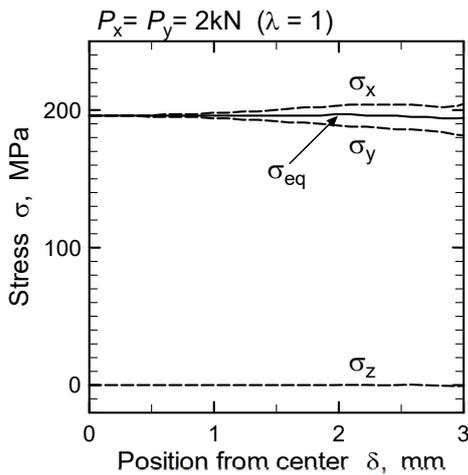


図4 標点部の応力成分

Marc/Mentat 2010 を用いた。オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 鋼の 923 K での材料定数として、ヤング率 $E=150\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ を仮定し、さらにそのクリープ定数として、文献から得られた次式(1)の Norton 則¹⁾を用いた。

$$\dot{\epsilon} = 3.05 \times 10^{-19} \times \sigma^{6.29} \quad (1)$$

解析結果の一例として、 P_x (X 軸方向の荷重) = P_y (同 Y 軸方向) = 2 kN で負荷直後の Mises 型相当応力のコンター図を、図 3 に示す。標点部において約 200 MPa の相当応力を生じて、その分布は標点部で均一を実現できていることがわかる。標点部の応力分布について、試験片中心からの距離と各応力との関係を図 4 に示す。図中に実線で示した Mises 型相当応力は、標点部中心から 2.5 mm までの範囲において、その変化は $\pm 5\%$ 以内である。また σ_z がゼロであることから、今回設計した小型十字型試験片の標点部は平面応力状態を実現できている。

本研究課題では応力多軸性を表現するために、次式(2)で定義する主応力比 λ を用いる。

$$\lambda = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (2)$$

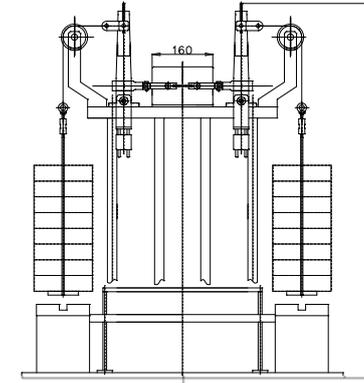
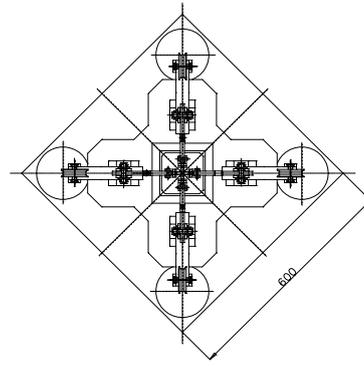
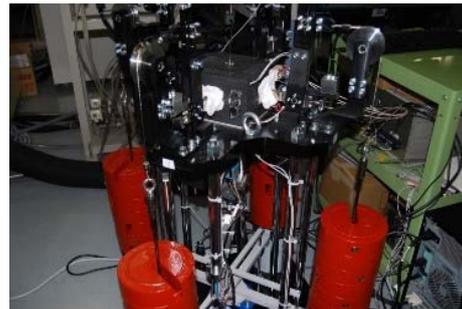
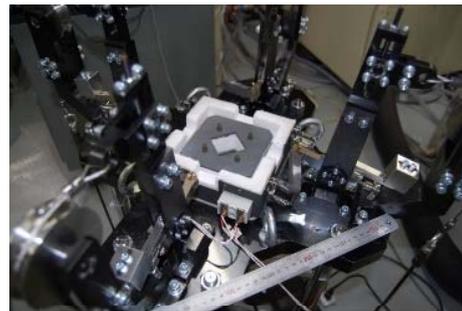


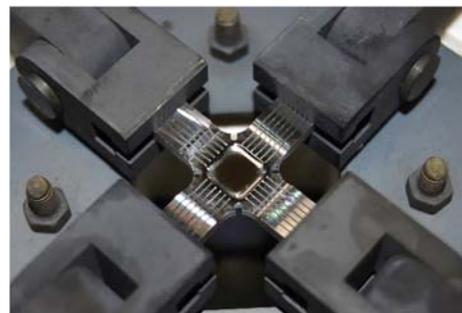
図5 高温多軸クリープ試験装置



(a) 試験装置全体



(b) 電気炉下部 (観察窓)



(c) 試験片取付け状態

図6 試験装置外観写真

ここで、 σ_1 、 σ_2 はそれぞれ最大主応力、最小主応力である。本研究課題での十字型試験片を用いた引張負荷では、X軸およびY軸方向の負荷荷重の組み合わせによって $0 \leq \lambda \leq 1$ の検証が可能である。

(2) 開発した高温多軸クリープ実験装置

小型十字型試験片用に開発した高温多軸クリープ試験装置について、その全体イメージ図を図5に示す。また、試験装置の写真例として、全体写真、上下二つ割れ式電気炉の下部側の写真および試験片取付け状態写真を、それぞれ図6の(a)、(b)および(c)に示す。試験装置は土台部分が600 mm×600 mmで、試験装置全体高さは1,000 mmである。十字型試験片のX軸方向およびY軸方向それぞれに独立して重錘を用いて引張荷重を負荷することで、任意の多軸応力状態での試験を可能とする。試験装置の全体寸法をコンパクトにする目的から、本装置では受け皿に積載した重錘の重量を5倍に増幅して、試験片に引張荷重を負荷する機構を有している。試験片に対する最大荷重容量は2 kNである。

試験片は加熱容量1 kWの電気炉を用いて加熱する。電気炉は図6(b)に示したように上下二つ割れ式であり、その下部には石英ガラス製の40 mm×40 mmの観察窓を設けた。この観察窓を介して試験中の試験片の様子を光学カメラで観察する。

(3) 開発した非接触手法による変位計測技術

試験片の小型化は多くの利点を有するが、その一方で標点部寸法も小さくなることから、その変位計測は困難である。従来の機械式変位計測機器は使用が困難であることから、本研究課題では観察画像を用いた非接触式の変位計測手法を開発した。具体的には、試験片標点部の荷重負荷軸上に直径0.3 mm程度の微小なターゲットマークを、耐熱インクを用いて記しておく。電気炉下部に設けた石英ガラス製の観察窓から1000万画素程度のCMOSセンサー式の光学カメラを用いて、標点部周辺の静止画を定期的に収録する。収録した静止画の画像解析によってターゲットマークの軌跡を数値化する手法である。

本手法の妥当性検証の例として、室温でのアルミニウム合金平板の引張試験でのひずみ算出結果を図7に示す。なお、同平板試験片裏面には二軸直交ひずみゲージを貼付して、ひずみゲージでの計測値とターゲットマークの軌跡から算出したひずみとを比較した。非接触手法で算出したひずみは、引張軸方向の縦ひずみのみならず、横ひずみについてもひずみゲージ値と良好に一致した。さらに、ひずみゲージでは計測不能であった大変形時のひずみも算出可能であった。

高温環境での非接触式変位計測手法の妥当性検証結果についてはその図示を省略するが、573 KでのSUS304鋼の引張試験でのひずみも精度良く計測可能であった。さらに、ターゲットマークを試験片に記す際に使用する市販の耐熱インクは、923 Kの高温環境でも、1000時間程度までは消滅しないこともあらかじめ確認した。なお、開発した非接触手法は、変位計測目的に使用できるのみならず、たとえば粒界割れやき裂の成長の様子などのその場観察も可能とする。

(4) オーステナイト系ステンレス鋼を対象とした高温多軸クリープ実験

実験方法: オーステナイト系ステンレス鋼を用いて、 $\lambda=0$ および $\lambda=1$ のクリープ試験を行った。 $\lambda=0$ の単軸試験には、一軸方向のみの荷重負荷用腕部を有する試験片を用いた。

試験温度923 K (650 °C)、応力 $\sigma=208$ MPaの単軸クリープ試験でのクリープ曲線を図8に示す。図中には荷重負荷用重錘の移動量を不定期に計測した結果も併せてプロットしたが、標点部の変位は重錘の移動量と定性的に対応している。本研究課題で開発した非接触式の手法を用いて破断直前までの標点部の変位を計測可能であることがわかる。さらに、試験中の標点部周辺の観察画像の一例を図9に示す。同図は破断直前の様子であるが、試験片標点部の変形や、き裂の

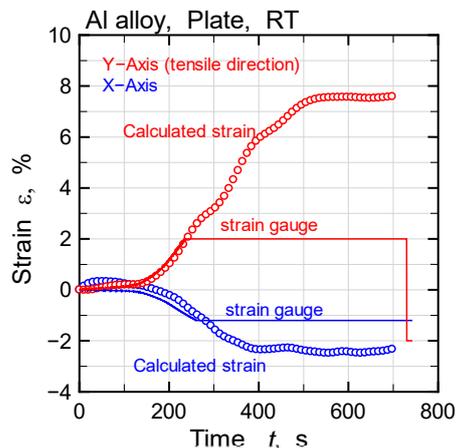


図7 非接触手法による変位計測結果

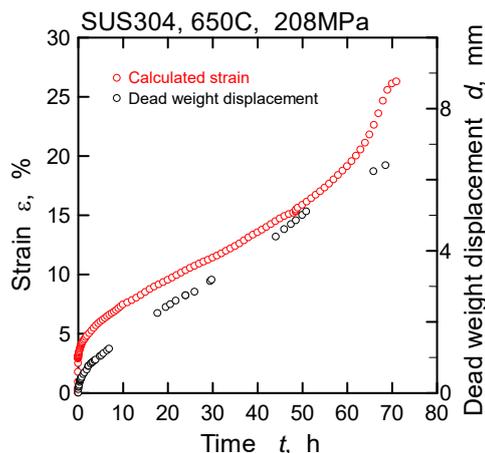


図8 単軸クリープ曲線と重錘変位

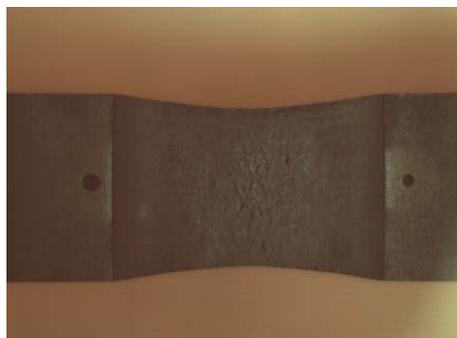


図9 単軸クリープ試験中の試験片観察結果

連結やき裂が開口している様子がわかる。これらのことから、観察画像を基にした非接触手法は、標点部変位を算出できるのみならず、試験中の試験片の変形や、き裂の発生および伝ば状況を詳細に観察できる利点も有していると思われる。

試験温度 943 K (670 °C), 相当応力 $\sigma_{eq}=200$ MPa の多軸クリープ試験でのクリープ曲線を図 10 に示す。X 軸および Y 軸方向の破断までのひずみを、独立して計測可能である。なお、等二軸引張であるにも関わらず X 軸と Y 軸方向のひずみが完全には一致していない。本試験に用いた試験片は、試験装置の動作確認にも使用したため、荷重と温度の負荷履歴を有しており、得られたクリープ特性等は処女材のそれらとは異なることも要因として考えられる。さらに、観察画像の一例として、破断直前の様子を図 11 に示す。試験片標点部には、その寿命後半から、粒界割れに起因すると思われる表面の凹凸が数多く観察された。

上述したように、本研究課題によって、小型十字型試験片を用いた高温多軸クリープ実験による構造材料の損傷量評価手法を構築した。

<引用文献>

1) National Research Institute for Metals, Japan, NRIM Creep Data Sheet No. 4B, (1986).

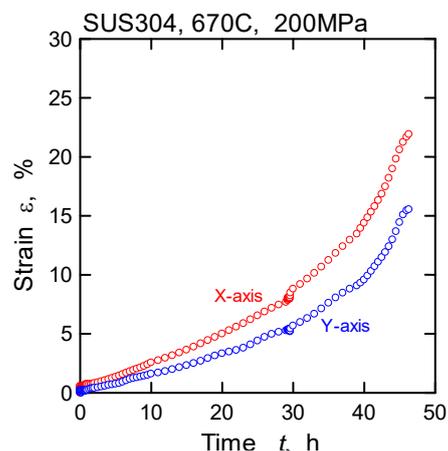


図 10 多軸クリープ曲線



図 11 多軸クリープ試験中の試験片観察結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----