

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04089

研究課題名（和文）実機から採取した微小素材を用いた高温多軸引張クリープ試験による寿命評価法開発

研究課題名（英文）Development of life evaluation method by high temperature multiaxial creep test using small size materials taken from actual components

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） 3,400,000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等では、その形状不連続性や複雑な外力負荷によって高温多軸クリープ損傷を受ける。多軸クリープ実験でも評価素材の縮小化が要求されることから、本研究課題では、実機から採取した微小素材での多軸クリープ試験技術開発に取り組んだ。有限要素解析と機械加工技術検討を経て、外径約45 mm、肉厚約8 mmの小径管から採取した素材で作成可能な溶接タイプ十字型試験片を設計した。さらに、ステンレス鋼Super304Hの多軸クリープ破断寿命整理にはMises型相当応力が有効であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実機配管等から採取した素材のみで、それらの損傷を定量的に把握できることは、適切な余寿命診断や機器の安全性保障につながる。多軸応力での破断寿命評価は、これまでは汎用的な丸棒試験片での実験データを基にした予測に頼らざるを得なかったが、提案手法によって、実験的に明らかにすることを可能とした。安定した電力供給にも直結することから、産業界にも大いに有益である。ミニチュア十字型試験片の中央標点部は平面応力を実現している。さらに、実験中の電気炉内部の中央標点部の変形をその場観察する機能も備えている。高温多軸応力状態でのき裂発生や進展も可視化できたことから、破壊のメカニズム解明等の学術面でも有意義である。

研究成果の概要（英文）：Boiler pipes in thermal power plants are subjected to multiaxial creep damage at high temperatures due to their shape discontinuities and complex loadings from external forces. As the size of the material to be evaluated must be downsized even in multiaxial creep tests, this study was conducted to develop a multiaxial creep test technique using a small sample of the material taken from the actual plant. Based on finite element analysis and machining investigations, we designed a weld-type cruciform specimen that can be made from a small-diameter pipe with an outer diameter of approximately 45 mm and a wall thickness of approximately 8 mm. It was also found that Mises type equivalent stresses are effective for the multiaxial creep rupture lifetime of Super304H stainless steel.

研究分野：材料強度

キーワード：クリープ 多軸 寿命評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力は産業活動や日常生活に不可欠であるが、その安定供給のためにも、発電プラントの健全性保障が重要である。また、航空旅客数は世界的に増加傾向であり、航空エンジンの燃費向上やさらなる安全性確保が要求される。ボイラー配管やタービン動翼等に代表される高温構造機器は、高温環境で複雑な応力状態 (= 多軸応力) に曝されることから、それらの構造材料の経年劣化損傷を高精度かつ定量的に把握できる寿命診断技術が要求される。

これらの課題解決のために、試験評価データが不可欠であるが、処女材については、汎用的な丸棒試験片で単軸応力での特性データのみを取得して安全係数を考慮しているのが実状であり、多軸応力がクリープ特性や破断寿命に及ぼす影響については未解決である。さらに、実機構造材料の損傷量を実験的に評価したい場合には実機から素材を採取して試験片を加工するが、これまでに提案されている高温多軸クリープ試験用試験片サイズは 200 mm×200 mm 程度の面積が必要であり、現実的ではない。

放電サンプリング装置等の既存技術を用いて実機配管等から採取した微小寸法の評価対象素材で高温多軸クリープ試験を実施したり、損傷量評価できる技術開発が求められている。

2. 研究の目的

上述のニーズに応えるべく、本研究課題では以下を目的として遂行した。

- ・実機から採取できる寸法の微小素材で作成可能な多軸クリープ試験片を設計する
- ・高温多軸クリープ試験データを取得して寿命評価式を開発する

具体的には、ボイラー配管での使用実績の多いオーステナイト系ステンレス鋼を対象とする。実機小径管 (外径 45 mm 程度、肉厚 8 mm 程度) から採取可能な素材で作成できる多軸試験片を用いて実験データを蓄積する。

3. 研究の方法

2. で前述した目的の達成のために、以下の(1)および(2)の2項目を解決した。

(1)溶接タイプ十字型試験片の設計

素材寸法を縮小化するために、評価対象素材で作成した標点部に、別に準備した荷重負荷用つかみ部を溶接するタイプの試験片を開発した。具体的には、有限要素法解析で形状寸法等の妥当性を確認するとともに、溶接技術も検討した。

(2)多軸クリープ試験

(1)で設計した溶接タイプ十字型試験片を用いて高温多軸クリープ試験を行い、その有効性を検証した。さらに、クリープ特性や破断寿命データを精査して多軸クリープ寿命評価式を検討する。供試材は Super304H であり、その化学成分を表 1 に示す。

多軸クリープ試験には、先行研究¹⁾で開発したミニチュア十字型試験片用多軸クリープ試験機を用いた。同試験機は、十字型試験片の直交する X 軸および Y 軸方向それぞれに引張荷重を負荷するが、それらの荷重の組合せによって、任意の多軸応力状態での引張クリープ試験が可能である。本研究では、応力多軸性を表現するために、次式(1)で定義する主応力比 (λ) を用いた。

$$\lambda = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (1)$$

ここで、 σ_1 、 σ_2 はそれぞれ最大主応力、最小主応力であり、この定義に従えば、本試験装置を用いた多軸クリープは、 $0 < \lambda < 1$ が検証可能である。

表 2 に多軸クリープ試験条件を示す。試験温度は 973 K (700°C) とした。 $\lambda = 1$ (等二軸引張) については、つかみ部素材の影響も調査した。すなわち、Super304H は小径チューブとして出荷されることがほとんどであり、所望の寸法のつかみ部素材が入手できるとは限らない。そこで、つかみ部に Super304H を用いた試験片 (共材試験片とよぶ) と、汎用的に入手可能な SUS316 を用いた試験片 (異材試験片とよぶ) の 2 種類を用いて、標点部の変形の様子等を調査した。

表 1 化学成分および熱処理条件

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Nb	N	Al
0.083	0.23	0.80	0.029	0.001	2.96	18.54	8.57	0.50	0.111	0.018

表 2 多軸クリープ試験条件

温度 T, K	No.	主応力比 λ	Mises 相当応力 σ_{eq}, MPa	最大主応力 σ_1, MPa	最小主応力 σ_2, MPa	つかみ部の材料
973		1.0	180	180	180	Super304H
		1.0	180	180	180	SUS316
		1.0	140	140	140	Super304H
		0.5	155.9	180	90	Super304H

4. 研究成果

(1) 溶接タイプ十字型試験片の設計

(1-1) 形状および寸法

各部位の形状寸法を系統的に変更させて、試行錯誤的な検証で決定した溶接タイプミニチュア十字型試験片の形状および寸法を図 1 に示す。試験片中央には 5 mm×5 mm で板厚 1 mm の標点部を有しており、その標点部から四方向に荷重負荷用のつかみ部を有している。同図において、EB-Weld と表記した標点部の中央から左右 (X 軸方向) それぞれに 7 mm の位置で、つかみ部を溶接することで評価対象素材寸法の縮小化を達成した。

弾クリーブ解析の一例として、共材試験片 (No.) の 973 K、軸荷重 2 kN の等二軸引張負荷 ($\lambda=1.0$) での Mises 型相当応力分布を図 2 に示す。同図は荷重負荷から約 10 h 経過後の様子である。標点部外周での応力集中が避けられないが、応力の再配分によって試験開始から 10 h 程度で標点部の応力は均一化されることがわかった。標点部中心からフィレット部にかけて応力が変化するが、その応力変化や分布は、中心から 2.5 mm の範囲では σ_x 成分と σ_y 成分ともに $\pm 3.9\%$ であった。 σ_z 成分は、標点部全域でほぼゼロであり、平面応力を実現できている。

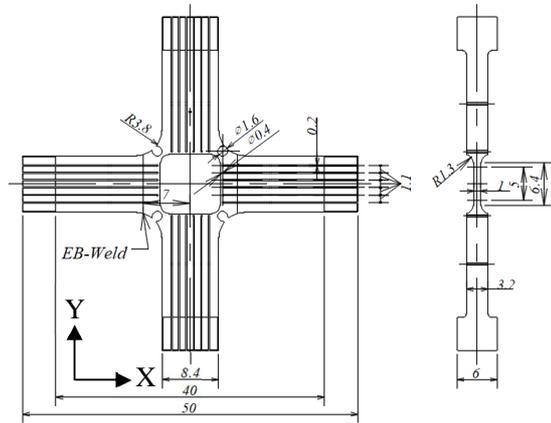


図 1 溶接タイプ試験片の形状および寸法 (mm)

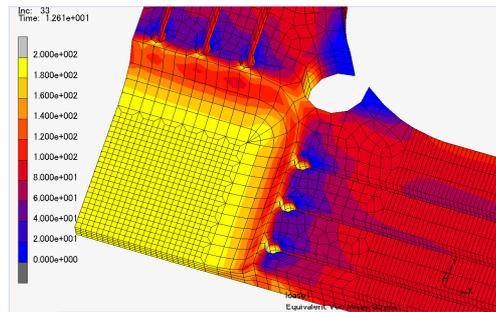
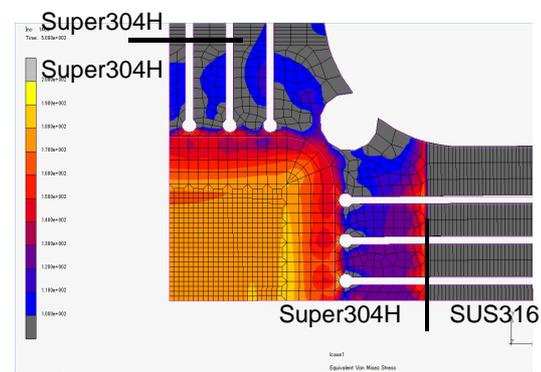


図 2 Mises 型相当応力分布の例

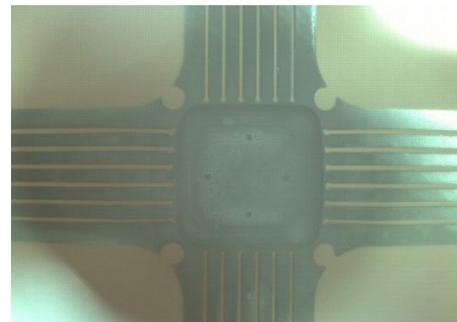
(1-2) つかみ部の継手材質の影響

つかみ部材質の影響調査結果の一例を図 3 に示す。同図(a)は、試験片の Y 軸つかみ部が Super304H で、X 軸つかみ部が SUS316 の異材試験片の $\lambda=1$ (等二軸引張条件) での Mises 型相当応力分布である。X 軸上の応力が Y 軸側に比べて高い応力を示すことがわかる。等二軸負荷であっても、標点部の応力に不均一を生じることが示唆される。

異材試験片について No. の試験開始から約 900 時間経過したときの電気炉内部の試験片の変形観察結果を図 3(b)に示す。試験片板厚変化部のラインがやや樽状に変形していることがわかる。これは、X 軸方向の変形量が Y 軸方向のそれに比べて大きいことを示しており、つかみ部に使用する材料が標点部近傍の変形に影響を及ぼすことを示している。これらのことから、溶接タイプ十字型試験片を準備する際には、荷重負荷つかみ部には、可能な限り共材を使用することが望ましい。



(a) FEM 解析の一例



(b) 700 , $\lambda=1$ で約 900 時間経過時 (No.)

図 3 異材継手材の影響 (Mises 型相当応力)

(2) オーステナイト系ステンレス鋼の多軸クリーブ試験

(2-1) 多軸クリーブでの破壊形態

クリーブ破断後の試験片の外観写真を図 4 に示す。No. は共材試験片の $\lambda=1.0$ の結果であるが、その巨視的な破断方向は荷重負荷軸に対して約 45°方向および Y 軸方向への開口であった。No. は異材試験片の $\lambda=1.0$ の結果であるが、巨視的には Y 軸方向に開口していた。No. は共材試験片の $\lambda=1.0$ で低応力での結果であるが、高応力の No. と同様に、巨視的な破断方向は荷重負荷軸に対して約 45°方向および Y 軸方向への開口であった。No. は共材試験片の $\lambda=0.5$ (非等二軸引張) の結果であるが、最大主応力側である Y 軸方向に開口して破断する結果であった。

(2-2) クリーブ破断寿命評価の材料依存性の検討

共材試験片について、電気炉内の試験片標点部の観察撮影写真から算出した公称ひずみの変化を図 5 に示す。共材試験片の $\lambda=1.0$ (No.) の X 軸方向ひずみと Y 軸方向のひずみは、ほぼ同程度であり、約 14% 程度の値を示した後に破断した。低応力の No. でも、軸ひずみは X 軸方

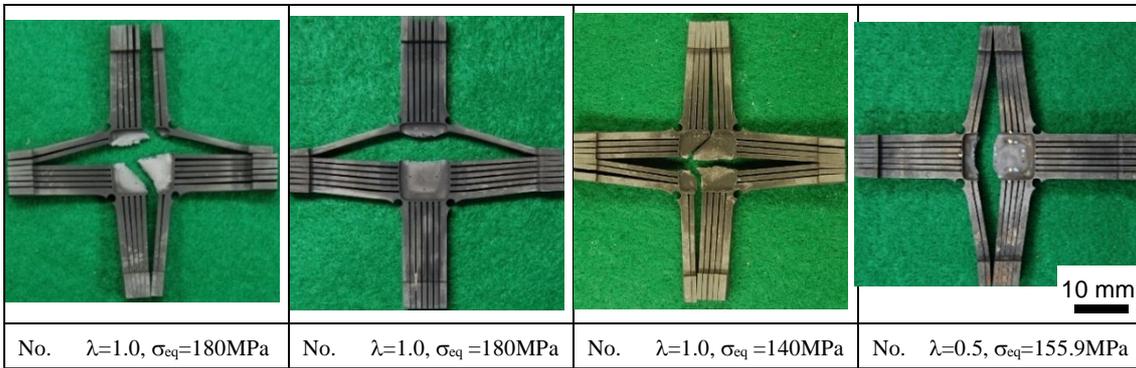


図4 クリープ試験終了後の試験片の外観

向と Y 軸方向で同程度であり、破断直前には約 10%であった。非等二軸の $\lambda = 0.5$ (No.)では、最大主応力方向の X 軸方向ひずみに対して最小主応力方向の Y 軸方向ひずみは著しく小さかった。破断直前で X 軸方向ひずみが約 8%であったのに対し、Y 軸方向ひずみは 1%程度であった。

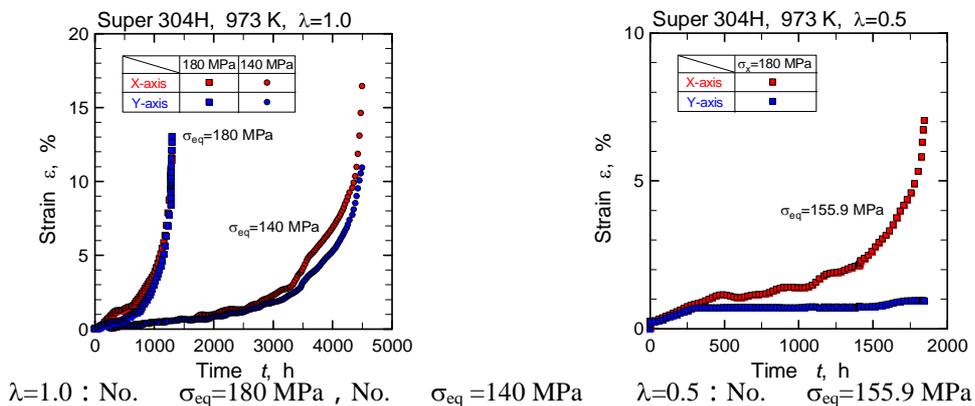


図5 標点部観察画像から算出したクリープ曲線

Super304H のクリープ破断寿命整理結果を図 6 に示す。多軸クリープ寿命評価式の妥当性を検証するために、同図(a)には Mises 型相当応力での整理結果を、(b)には最大主応力での整理結果をそれぞれ示す。図中の実線は NIMS の単軸データ²⁾を基にした近似ラインであり、破線はその係数 2 の範囲を示している。同図より Super304H の 973 K の多軸クリープ破断寿命整理には、Mises 型相当応力が有効であることが示唆される。Mises 型相当応力を採用することで、 $\lambda = 1.0$ が NIMS データに較べてやや長寿命側整理となるものの、ほぼ係数 2 の範囲内の整理であった。一方の最大主応力基準では、 $\lambda = 0.5$ が係数 2 の範囲を超える長寿命側整理であった。

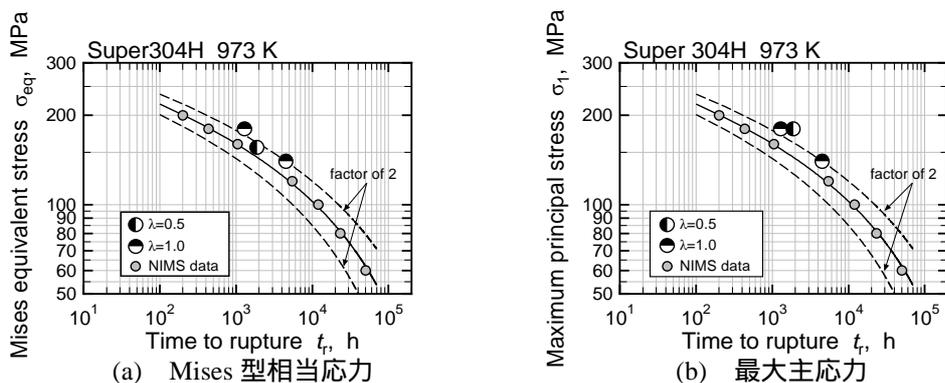


図6 多軸クリープ破断寿命評価結果

< 引用文献 >

- 1) N. Hiyoshi, T. Itoh, M. Sakane, T. Tsurui, M. Tsurui and C. Hisaka, “Development of miniature cruciform specimen and testing machine for multiaxial creep investigation”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol.108, pp.102582 (2020).
- 2) NIMS Creep Data Sheet, No.56A, National Institute for Materials Science, Japan (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Noritake Hiyoshi, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Takafumi Tsurui, Masaaki Tsurui, Chiaki Hisaka	4. 巻 108
2. 論文標題 Development of miniature cruciform specimen and testing machine for multiaxial creep investigation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 102582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2020.102582	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 旭吉雅健, 伊藤隆基, 坂根政男, 鶴井孝文, 鶴井昌徹, 日坂知明	4. 巻 70
2. 論文標題 ミニチュア十字型試験片を用いたSUS304鋼の高温多軸クリープ特性評価技術の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 93-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.93	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 坪山響介, 旭吉雅健, 伊藤隆基
2. 発表標題 ミニチュア十字型試験片を用いたSUS304鋼の多軸クリープ寿命評価
3. 学会等名 日本材料学会 第70期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyouusuke Tsuboyama, Noritake Hiyoshi
2. 発表標題 Multiaxial creep life and damage evaluation for type 304 stainless steel using miniature cruciform specimen
3. 学会等名 2021 International Symposium on Structural Integrity Hangzhou, China (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪山響介
2. 発表標題 SUS304のミニチュア十字型多軸クリープ寿命評価および損傷評価の試み
3. 学会等名 日本材料学会高温強度部門委員会 第1回学生および若手研究者による材料研究の最前線
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 旭吉雅健, 若原いつか, 坪山響介, 張聖徳, 伊藤隆基, 坂根政男
2. 発表標題 多軸クリープ試験に用いる溶接タイプミニチュア十字型試験片の設計
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪山響介, 旭吉雅健
2. 発表標題 ミニチュア十字型試験片を用いたオーステナイト系ステンレス鋼の高温多軸クリープ寿命評価
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 旭吉雅健, 伊藤隆基, 坂根政男, 鶴井孝文, 鶴井昌徹, 日坂知明
2. 発表標題 ミニチュア十字型試験片を用いたSUS304鋼の多軸クリープ特性評価
3. 学会等名 日本材料学会 第57回高温強度シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------