

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560072

研究課題名（和文） 微小サンプルによる高温クリープ試験法

研究課題名（英文） High-Temperature Creep Testing Method using Small Sample Specimens

研究代表者

小林 謙一 (KOBAYASHI KEN-ICHI)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50114278

研究成果の概要（和文）：

微小サンプル・クリープ試験法の一つである、スモール・パンチ・クリープ(SPC)試験結果に影響する各種因子を実験的に検討した。大気中と真空中のSPC試験を比較した結果、破断寿命が1000時間前後で破断特性が変化した。これは酸化皮膜の影響によるものであった。単軸クリープ試験の負荷応力とSPC試験荷重には良い相関があり、SPC試験が高温・劣化構造部材のクリープ余寿命診断に有用であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Small Punch Creep (SPC) test is one of the semi-destructive tests employing miniature specimens. Some factors of the SPC test affecting test results were experimentally studied. It was found that rupture lives conducted in air were quite different from those in vacuum when the rupture life was shorter than 1000 hours. This result depended on the influence of the oxide film and the coefficient of friction. However, there was a good relation between the stress in the conventional uni-axial creep test and the load in the SPC test when the rupture life was the same. This relationship helps to evaluate remaining creep life of long-term serviced components under elevated temperatures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：微小クリープ、余寿命診断、試験法、スモール・パンチ

1. 研究開始当初の背景

30年以上使用した高経年発電設備のうち、各種診断/検査の後、一定の健全性を確保できるものは初期設定寿命を延伸して使用すると、構成部材の有効利用とともに設備費を大幅に節減できる。しかしながら高温機器の大半は供用期間中にクリープ損傷を生ずる。

これら高温構造部材の損傷状態を調べる際、従来の単軸クリープ試験片では体積が大きいため、損傷検査後にも再利用するには微小領域の破壊的クリープ試験が望ましい。このため微小領域での高温強度(特にクリープ強度)を把握できる新たな微小破壊試験法が求められていた。

2. 研究の目的

従来の単軸クリープ試験片と比べて、体積で約 1/300 となるスモール・パンチ(SP)クリープ試験が注目されている。しかしながら SP クリープ試験法は国内外で統一的な標準試験法がまだ確立されていない。SP クリープ試験の標準試験法を制定するには、種々存在する試験条件が試験結果に与える影響を把握する必要がある。本研究では、試験雰囲気とそれに伴う酸化皮膜と下部ダイ肩部半径が試験結果に及ぼす影響について実験的に検討し、標準試験法を確立に寄与する。

3. 研究の方法

(1) SP クリープ試験機の設計・製作

これまで研究室に設置された SP クリープ試験機は大気中でしか実験できなかったため、高真空条件(7×10^{-3} Pa)下でも実験できる装置(図 1)を新たに設計・製作した。これにより試験雰囲気が SP クリープ試験結果に与える影響を検証できるようにした。



図 1 試作した SP クリープ試験機

(2) 試験材料および試験方法

試験材料には、32mm 厚の圧力容器用圧延鋼板(SCMV4 鋼: 2.25Cr-1Mo 鋼相当)を用いた。

SP クリープ試験片は直径 10mm、厚さ 0.5mm のディスク型試験片である(図 2 参照)。まず、上記鋼板・圧延方向から 10mm 丸棒を旋削後、ワイヤ放電加工機で厚さ約 0.6mm の SP クリープ試験片を切り出した。その後、機械研磨(#500~#2000)後、バフ研磨で厚さが 0.500 ± 0.002 mm となった試験片のみを SP クリープ試験に供した。

試験温度はすべて 600°C 一定とした。

SP クリープ試験は、試験片・上下面の周辺



図 2 SP クリープ試験片など

を堅く固定し、直径 2mm の負荷ボール(Si_3N_4)を SP クリープ試験片の中央に負荷した。各 SP クリープ試験は、負荷ボールが SP クリープ試験片を貫通(破断)するまで行った。実験中、負荷ボールの変位量は電気炉外にてリニアゲージで連続的に計測し、ペン・レコーダに記録した。

SP クリープ試験は、試験雰囲気(大気中、真空中)と試験荷重 F を変化させながら、系統的に実施した。また単軸クリープ試験の負荷応力 σ との相関を調べるため、平行部直径が 8mm の単軸クリープ試験も別途、実施した。

大気中、真空中の試験では、SP クリープ試験片表面に形成された酸化皮膜の種類/厚さが異なった。このため、長時間の SP クリープ試験では、同一環境下にダミー試験片を置き、試験終了後、酸化皮膜の付いたダミー試験片と負荷ボール間の摩擦係数をスリップテスターで計測した。

試験終了後、SP クリープ試験片・縦断面を X 線マイクロアナライザーで定性分析した。

このほか、単軸クリープ試験で得たクリープ構成式を入力データとして用いて、弾クリープ FEM 解析を行った。一連の数値解析から、SP クリープ試験中の変形過程や試験片内の応力/ひずみ分布を求め、単軸クリープ試験との相関関係を考察した。

4. 研究成果

(1) SP クリープ試験に及ぼす試験雰囲気の影響

一連の SP クリープ試験結果を図 3 に示す。最長破断時間は、2000 時間(約 80 日)に及び、実用的に極めて貴重なデータが得られた。

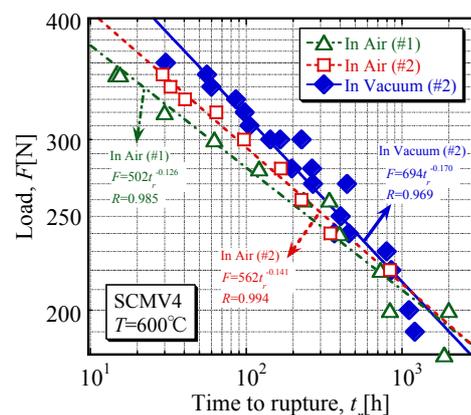


図 3 SP クリープ試験結果

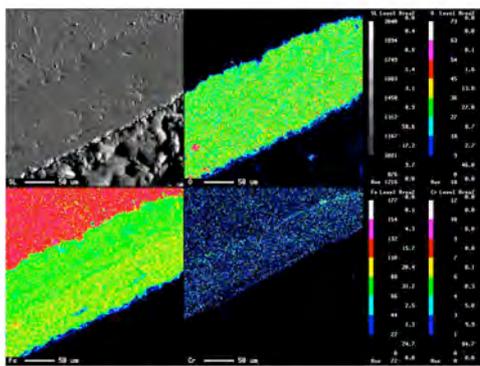
SP クリープ試験結果には試験雰囲気のほかに、試験機内・構成部品の形状寸法も影響した。図 3 中の #1、#2 は試験機の番号である。各試験機はそれぞれ、SP クリープ試験片が貫通する下部ホルダーの肩部半径 r が異なっている(試験機 #1: $r=0.6$ mm、同 #2: $r=0.5$ mm)。

図 3 中の直線は各 SP クリープ試験結果を最

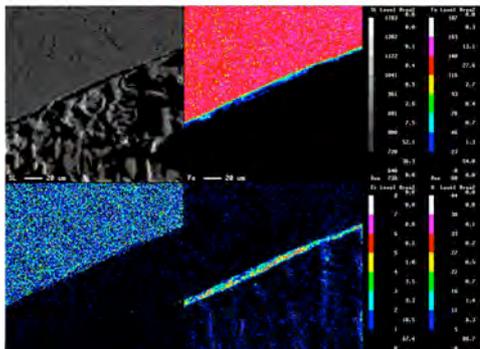
小二乗近似した結果である。これより、試験雰囲気(□と◆)、下部ホルダー・肩部半径(△と□)について比較できる。

図3より、試験条件で結果に相違があることが分かる。ただし明瞭な差は破断時間が1000時間以下の短時間側に現れ、長寿命側では試験条件や部材寸法には依存しない傾向となった。

試験雰囲気の影響(同一試験機を用いた実験)に着目すると、短寿命側では当初の予測通り、真空中(◆印)より大気中(□印)で寿命が短くなった。しかしながら、長時間側では両者に差異がほとんど現れなくなった。これは試験片表面に形成された酸化皮膜の性状が変化したためと、図4のX線分析結果から明らかになった。



(a) 大気中



(b) 真空中

図4 試験片表面に形成された酸化皮膜内の成分分析

図4(a)右下図と図4(b)左下図が試験片内のCr成分である。これより、最表面に形成された酸化皮膜の成分は、大気中ではFeのみの酸化物であるが、真空中ではFeとCrの混合酸化物であることが分かった。この酸化皮膜と負荷ボールとの摩擦係数が両者では異なり、破断寿命に影響した。

図5は、SPクリープ試験で得たダミー試験片を用いて測った摩擦係数である。真空中でのSPクリープ試験片に外観的な変化はなかったが、試験時間とともに変化した。長時間試験では大気中の試験片と摩擦係数が大差

なかったため、試験雰囲気の影響が現れなかったと考えられる。

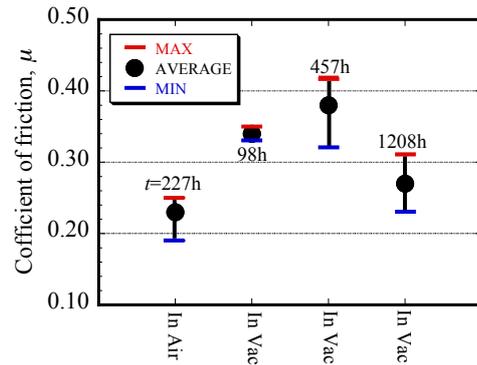


図5 試験雰囲気と摩擦係数

(2) SPクリープ試験に及ぼす下部ダイ・肩部半径の影響

図3中には下部ダイ肩部が試験結果に影響することが分かる。すなわち同一雰囲気(大気中)では、肩部半径が小さい場合(□印)より、大きい場合(△印)に短寿命となった。これは別途実施した、弾クリープFEM解析結果からも明らかになった。図6は肩部半径 r を0.1mm~1mmまで変化させたとき得られたクリープ変位線図である。

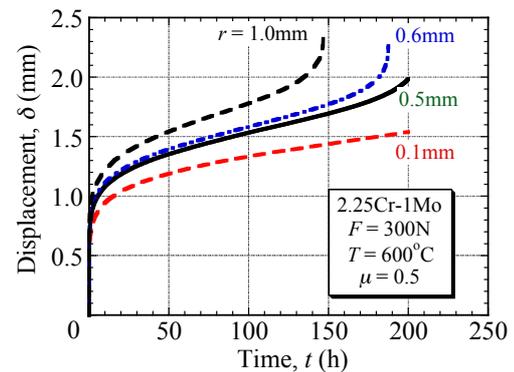


図6 下部ダイ肩部半径の影響

このようにSPクリープ試験では肩部半径 r の影響を受けるため、試験片ジグの寸法にも注意する必要があることが分かった。

(3) SPクリープ試験の負荷荷重 F と単軸クリープ試験の負荷応力 σ の比 F/σ と破断寿命の関係

SPクリープ試験が単軸クリープ試験の代替試験法として活用できると実用上極めて有益である。このためには両者にいかなる関係があるか把握する必要がある。図7は、SPクリープ試験の荷重 F と単軸クリープ試験の応力 σ との相関関係 F/σ を、同一破断時間で整理したものである。

これまでの事例とはやや異なり、 F/σ 値は一定とはならず、破断寿命に依存した。しかし

ながら、この相関関係と SP クリープ試験結果を利用すれば、単軸クリープ試験の破断寿命を簡単に推定できるため、実用上、有用である。このほか Monman-Grant のクリープひずみ速度を SP クリープ試験での変位速度に変換したとき、SP クリープ変位速度と破断時間の間には高精度なべき乗則が成立した。

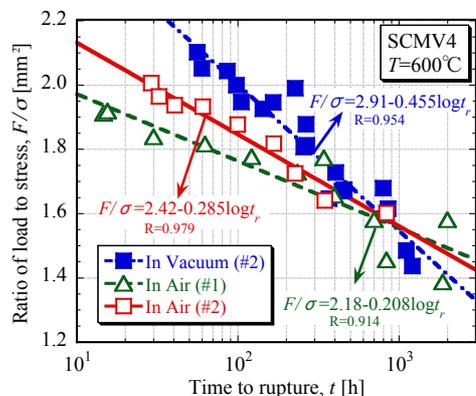


図7 同一破断時間に対する SP クリープ荷重と単軸クリープ応力 σ の関係

(4)まとめ

SP クリープ試験結果に影響を与える試験雰囲気、下部ダイ肩部半径に焦点を絞り、実験的に検証した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (i) 高荷重(短寿命)側では、試験雰囲気によって破断寿命に差異が見られた。しかしながら低荷重(長寿命)側では、試験雰囲気に影響されなかった。これは、試験片表面に形成された酸化皮膜(摩擦係数)の種類が変化したことによる。
- (ii) 試験器ジグのうち、下部ダイ肩部半径の微妙な差でも SP クリープ破断寿命には大きく影響した。これは特に短寿命側で顕著であった。これは弾クリープ FEM 解析からも支持された。

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)

〔雑誌論文〕(計2件)

- (1) Ken-ichi Kobayashi, Masahiro Kaneko, Hideo Koyama, Gavin C. Stratford and Masaaki Tabuchi, The Influence of Both Testing Environment and Fillet Radius of Die Holder on the Rupture Life of Small Punch Creep Tests, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.6, No.8, 2012, 925-934
- (2) 小林謙二, 金子将大, 小山秀夫, Gavin C. Stratford, 田淵正明, スモールパンチクリープ試験における変形, 破壊とその影響因子(試験雰囲気と下部ダイの肩半径について)、日本

機械学会論文集(A編), 第77巻 第784号, 2011, 2046-2053

〔学会発表〕(計8件)

- (1) Ken-ichi Kobayashi and Sho Takei, Influence of Testing Environment on SP Creep Rupture Lives, Proc. of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2013.7 予定, Paris, France
- (2) 武井翔, 永峰陽介, 小林謙二, 小山秀夫, SP クリープ試験の長時間破断寿命特性に及ぼす試験雰囲気の影響、日本機械学会・関東支部 第19期総会講演会, 2013.3, 八王子市
- (3) 武井翔, 小林謙二, 真空及び Ar ガス中での SP クリープ長時間寿命特性、第56回日本学術会議材料工学連合講演会, 2012.10, 京都市
- (4) Isamu Nonaka, Akihiro Kanaya, Shin-ichi Komazaki and Ken-ichi Kobayashi, Standardization of Test Method for Small Punch Creep Testing in Japan, 査読有, Proc. of 12th Int'l Conf. on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2012.5, Kyoto, Japan
- (5) 小林謙二, 金子将大, 武井翔, SP クリープ試験における試験雰囲気/試験条件と長時間破断寿命、日本材料学会 第61期学術講演会、岡山市, 2012.5
- (6) Ken-ichi Kobayashi, Masahiro Kaneko, Hideo Koyama, Gavin C. Stratford and Masaaki Tabuchi, Influence of Testing Environment and Radius of Die Shoulder on SP Creep Rupture Life, 査読有, Proc. of ASME Pressure Vessels and Piping Conf., 2011.7, Baltimore, USA
- (7) 小林謙二, SP クリープ試験における変形, 破壊とその影響因子、日本材料学会 第59期第4回高温強度部門委員会講演会, 2011.1, 京都市
- (8) 金子将大, 小林謙二, 小山秀夫, クリープ破断寿命に及ぼすスモールパンチ・クリープ試験片の酸化被膜の影響、日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 2010.10, 長岡市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 謙一 (KOBAYASHI KENICHI)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50114278

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

野中 勇 (NONAKA ISAMU)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40522066

田淵 正明 (TABUCHI MASAOKI)
(独)物質・材料研究機構・材料信頼センター・グループリーダー
研究者番号：60354239