

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：17701
 研究種目：基盤研究(B)（一般）
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17H03418
 研究課題名（和文）微小平板試験片を用いたクリープき裂進展特性評価法の開発と余寿命診断への適用

 研究課題名（英文）Development of New Procedure for Evaluating Creep Crack Growth Property with Small Plate-Type Specimen and Its Application to Remaining-Life Assessment

 研究代表者
 駒崎 慎一（Komazaki, Shin-ichi）

 鹿児島大学・理工学域工学系・教授

 研究者番号：70315646
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、微小ディスク状試験片（直径8mm，厚さ0.5mm）を用いてクリープき裂進展特性を評価するための新しい試験法を開発するとともに、本開発技術を高Cr耐熱鋼溶接継手部に展開し、超々臨界圧発電プラントの余寿命診断技術を確立することである。このような中、き裂のその場観察/計測には課題が残されているものの、き裂進展挙動を評価するための切欠きSPクリープ試験片を新たに提案した。また、本技術の適用を想定している高Cr耐熱鋼溶接継手部のSPクリープデータを拡充するとともに、新たな適用対象として有望な航空機エンジン用TiAl合金のSPクリープき裂進展挙動を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 本研究で得られた知見や開発技術は、原子力発電所など発電プラントに対する国民の信頼性が損なわれている昨今、経済的損失以外にも様々な社会的影響を生むこれら大型機器・構造物の破壊事故の未然防止につながるものと期待される。また、産業基盤技術の独創的な充実に促す波及効果を生み、産業界において広い応用展開が予想される「微小サンプルによる材料強度計測基盤技術」の実用化に貢献する成果である。

研究成果の概要（英文）：We have aimed to develop a new procedure for evaluating the creep crack propagation property with a miniaturized disk-type specimen (8mm in diameter, 0.5mm in thickness) in order to establish a remaining-life assessment technique for USC power plants, which are suffered from the Type IV creep failure of high Cr ferritic steel welded joints. In this research program, we have succeeded in proposing the new small punch (SP) creep test specimen with a radial or circumferential notch, although the in-situ measurement method of crack propagation rate have not yet been established. We have also succeeded in accumulating the SP creep data of high Cr ferritic steel welded joint and revealing the SP creep crack propagation behavior of TiAl alloy for aircraft engine, which can be an object for applying the developing technique.

研究分野：高温強度学

キーワード：スモールパンチクリープ試験 微小サンプル試験 クリープ き裂進展試験 耐熱材料 経年プラント 余寿命評価

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

高温のクリープ条件下にて使用される機器においては、クリープき裂進展特性が重要となる。これまでに実施されてきたクリープき裂進展試験に関する研究の大半は新材（未使用材）に関するもので、実機で長期間使用された経年材のクリープき裂進展に関する系統的な研究はまだ少ない。実機構造物の場合、ボイドや微小き裂等の損傷が存在することによって、高温でのき裂成長は約5倍に加速されることが示されている。しかしながらそのメカニズムは未解明であり、実機損傷材の高温破壊寿命を予測する場合の課題の一つとなっている。また、様々なき裂先端パラメータが現在提案されてはいるものの統一的理解には至ってはならず、クリープき裂進展試験法に加え、評価法に関する標準化が精力的に進められている。クリープき裂進展試験にはCT試験片やCCT試験片が使用されるが、これら標準的試験片は大型で、実機の経年劣化部位より材料をサンプリングし試験を行うには不向きであるため、できるだけ小さな試験片を用いたき裂進展試験が望まれる。

一方、USC発電プラントの主要構造部材である9-12%Crフェライト系耐熱鋼においては、溶接熱影響部（HAZ）外縁の細粒域にボイドや微小き裂が発生する、いわゆるType IVクリープ損傷といわれる低延性破壊型の早期破断が現在大きな問題となっている。設計による負荷応力の軽減対策などによるある程度の緩和が可能であるが、損傷機構が解明されていないため、根本的な解決策が提案されていないのが現状である。HAZ細粒域といった局所領域におけるクリープ特性やき裂進展特性を正確に計測・評価するには、やはり微小サンプルを用いた革新的な試験技術の開発が不可欠となる。

実機長期使用材では、材料劣化や損傷によりクリープき裂の発生や成長が加速され、実機より実際に切り出した微小サンプルを用いた高温破壊力学試験法が必要であるにも関わらず、そのような方法は未だ検討されることがないのが現状である。このような中、研究代表者らは微小ディスク形状試験片（例えば、直径8mm×板厚0.5mm）による新しいクリープ試験法すなわち“スモールパンチ（SP）クリープ試験法”を確立し、その有用性を世界に先駆け実証してきた。これまで得られた研究成果は、米国試験材料協会（ASTM）から最優秀論文賞、日本機械学会から研究奨励賞を受賞するなど、国内外で高い評価を受けている。2012年には、研究代表者らが中心となり、“一高温機器の余寿命診断のための一微小サンプルクリープ試験法標準”を日本材料学会・高温強度部門委員会より発刊している。今回提案する研究課題は、このSPクリープ試験技術の適用範囲をさらに拡大し、『実機経年材の高温破壊力学試験（き裂進展特性評価）』に新規展開しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究課題では、下記に示すような技術的・社会的ニーズに応えるため、SPクリープ試験法をベースに、微小ディスク状試験片を用いてクリープき裂進展特性、特にき裂発生初期の進展特性を正確に計測・評価するための新しい高温破壊力学試験法を開発する。さらには、本開発技術を9-12%Crフェライト系耐熱鋼の溶接継手部に展開し、超々臨界圧（USC）発電プラントなどの余寿命診断技術あるいは破壊リスク評価支援技術として確立する。

- ✓ 火力発電プラントにおいてもき裂進展特性評価に基づいた余寿命評価が重要となる。
- ✓ 実機長期使用材では、材料劣化や損傷によりクリープき裂の発生や成長が加速されるため、実機より実際に切り出した微小サンプルを用いた高温破壊力学試験が必要である。
- ✓ 9-12%Cr耐熱鋼の弱点である“Type IV損傷”を正確に評価する技術の確立が急がれる。

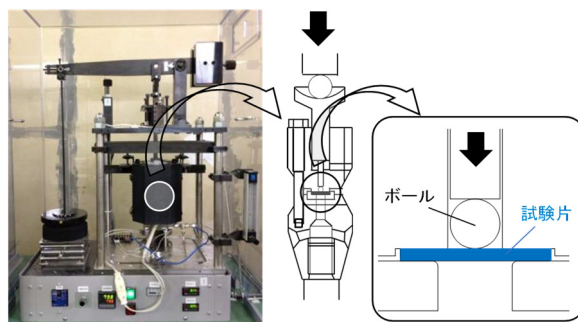


図1 SPクリープ試験装置

3. 研究の方法

クリープき裂進展計測用SPクリープ試験装置を製作した後、き裂進展計測用SP試験片の製作方法とき裂長さ計測方法を確立するとともに、き裂進展特性に及ぼす試験条件や試験片形状、治具形状等の影響を系統的に調べ、クリープき裂進展特性、特にき裂発生初期の進展特性を正確に計測・評価できる試験技術を確立する。

製作した試験装置を用いて、代表的な耐熱材料（例えば、高Crフェライト系耐熱鋼、A-USC用Ni基合金）のき裂進展データを取得する。また、SPク

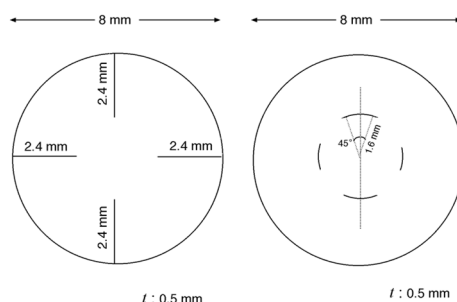


図2 切欠きSPクリープ試験片

リープ試験における高温破壊力学パラメータを開発するために、標準試験データも併せて整備するとともに、有限要素法によるき裂先端の応力・ひずみ解析や従来パラメータの適用性検討とそれらの改良を行う。その後、本開発技術を9-12%Crフェライト系耐熱鋼の“溶接継手局所領域”の劣化・損傷評価、余寿命診断へと展開する。

4. 研究成果

(1) SPクリープき裂進展特性評価試験

SPクリープ試験装置と試験治具の模式図を図1に示す。試験片は上部および下部ダイの間に固定し、4本のねじにより均一に締付ける。一定荷重はパンチャーとセラミックス製ボール(直径2.38mm)を通して試験片上面の中心に負荷される。試験片の変形量すなわち荷重線変位は、パンチャーの移動量を炉外にてLVDTを用いて測定することによって計測する。試験片の過度の酸化を防ぐため、試験は高純度アルゴンガス雰囲気中にて実施する。

新たに設計・開発したき裂進展特性評価のための切欠きSPクリープ試験片を図2に示す。申請当初、試験片の端と中央に切欠き(スリット)を導入し、試験中応力が高くなる部分がき裂先端に合うようにすることにより、き裂先端に定常クリープ領域が広がり、安定き裂成長が得られるものと考えた。しかし、その後、有限要素法による詳細な応力・ひずみ解析等の結果、円周上に切欠きを導入した方がより効果的であることがわかり、中央切欠きの代わりに円周切欠きを有するSPクリープ試験片を製作することとした。

供試材として、代表的な9%Crフェライト系耐熱鋼であるGr.91鋼とA-USC用Ni基合金のAlloy617を用いた。得られたSPクリープ試験結果の一例として、Alloy617の円周切欠き試験片の時間-変位曲線および時間-変位速度曲線を図3に示す。同図には、切欠きのないプレーンな試験片の結果も併せてプロットしてある。プレーン試験片の破断時間が180h程度であるのに対して、切欠き試験片のそれは60h程度と1/3程度短くなった。また、破断時の変位も1.5mm程度とプレーン試験片の2mm程度に比べ3/4程度に減少した。破断後の切欠き試験片のSEM像を示したものが図4である。巨視的な破壊は4つの切欠きをつなぐように円周上に沿って生じており、切欠き間では粒界破面が観察された。

デジタルマイクロスコープを用いたその場き裂長さ測定と直流電位差法によるき裂のモニタリングに関する検討を行っているが、発熱による光の乱反射や電位差の顕著な変化が得られないなどの理由から現時点ではまだうまくいっていない。そのため、クリープ試験を中断しながらき裂観察(き裂長さの測定)を行い、SPクリープき裂進展挙動に関する基礎的データをまずは取得することとした。図5は、700°C/270Nの試験条件下におけるAlloy617のき裂観察結果の一例であり、クリープ試験初期の様子を示している。今後は、クリープ中断試験とその後のき裂観察を種々の試験条件において引き続き行うとともに、デジタルマイクロスコープによるその場測定と直流電位差法によるモニタリングの実現のための技術的課題を克服するための検討を継続して行う。

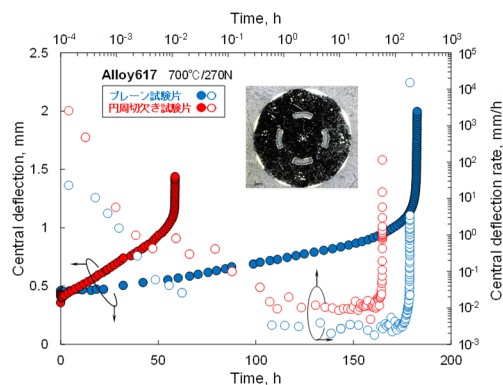


図3 Alloy617のSPクリープ試験結果

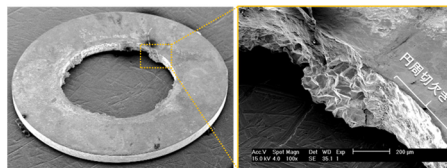


図4 破断後の円周切欠きSPクリープ試験片

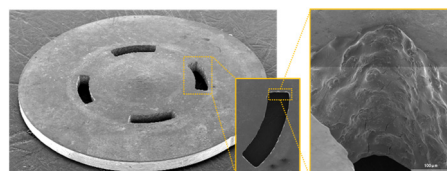


図5 中断後の円周切欠きSPクリープ試験片

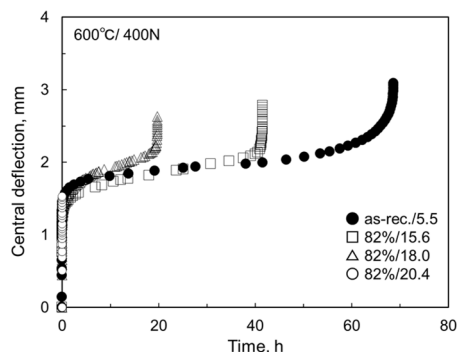


図6 Gr.122鋼溶接継手のSPクリープ試験結果

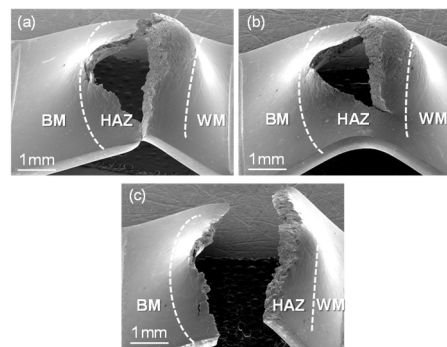


図7 Gr.122鋼溶接継手の破断試験片

(2) SPクリープ試験法を用いた 12%Cr 鋼溶接継手部のクリープ特性評価

本開発技術を 9-12%Cr 耐熱鋼溶接継手部局所領域の劣化・損傷評価へと展開するにあたり、Gr.122 鋼溶接継手部のクリープ損傷材を対象に SP クリープ試験データの拡充も並行して行った。寿命消費率 82 %のクリープ中断材の溶接継手部より採取した SP クリープ試験片で計測されたクリープ曲線を示したものが図 6 である。外表面からの距離が 15.6mm, 18.0mm, 20.4mm の位置から採取した試験片と受取りまま材（新材）の結果が示されている。いずれの試験片の破断時間も受取りまま材よりも短くなった。なお、採取位置が 20.4 mm の試験片については、荷重を負荷して間もなく破断し、残存寿命がほとんどなかったと思われた。図 7 は破断後の SP クリープ試験片の外観を示したものである。負荷後間もなく破断した 20.4 mm の試験片は、巨視的には脆性的な破壊形態を呈していた。破断位置を詳細に観察したところ、試験片採取位置によらず破壊はすべて HAZ の母材側で生じていた。今後、このようなサンプルを対象に、切欠きを導入した試験片と導入しない試験片を作製し、SP クリープき裂進展特性の計測・評価を行う。

(3) SP クリープ試験法を用いた TiAl 合金のクリープ特性評価

他の構造材料への本開発技術の適用性を検討する一環として、航空機エンジン用 TiAl 合金の SP クリープ特性も併せて調査した。760℃と 800℃の試験で得られた SP クリープ破断試験結果（荷重－破断時間曲線）を図 8 に示す。同図からわかるように、760℃においてばらつきが極めて大きい結果となった。負荷直後に試験を中断し、試験片表面を観察した結果が図 8 中の光学顕微鏡写真である。詳細は割愛するが、負荷直後にき裂がすでに形成されており、き裂のサイズや分布がマイクロ組織（ α/γ ラメラ組織のサイズと分布）と大きく関係していた。このようなき裂の発生・進展挙動の違いが破断試験結果のばらつきの原因であることが明らかとなった。SP クリープ試験を中断しながらき裂の進展挙動を調べた結果が図 9 である。同一の試験条件および中断時間であるにもかかわらず、巨視的き裂の発生・成長の様子が異なるのがわかる。得られた結果は、マイクロ組織の影響を大きく受けるこのような材料の初期のき裂発生・進展特性を正確に評価するには、本試験法のような技術が有用であることを示唆している。

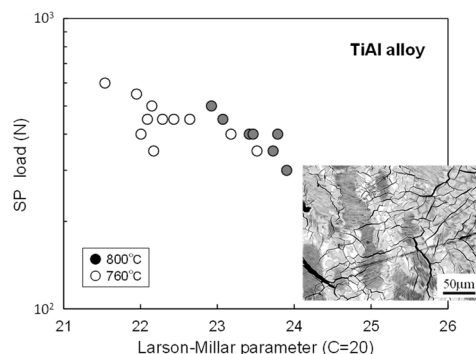


図 8 TiAl 合金の SP クリープ破断試験結果

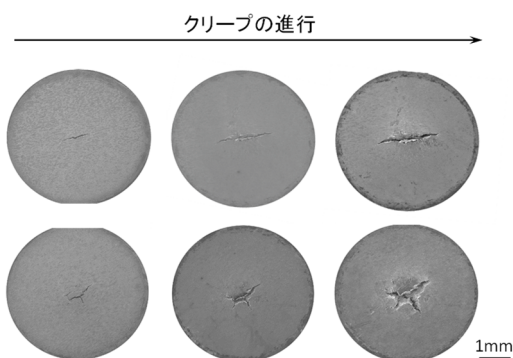


図 9 TiAl 合金の SP クリープき裂進展挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroki Sato, Shin-ichi Komazaki
2. 発表標題 Creep Property Assessment of Wrought Ti-43Al-5V-4Nb Alloy by Small Punch Test
3. 学会等名 45th MPA-Seminar (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上幸太郎, 駒崎慎一, 田淵正明, 本郷宏通
2. 発表標題 水素昇温脱離特性変化に基づいたGr.122鋼溶接継手のクリープ損傷評価
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

1. 発表者名 佐藤博希, 駒崎慎一
2. 発表標題 スモールパンチ試験法を用いたTi-43Al-5V-4Nbのクリープ特性評価
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
研究分担者	田淵 正明 (Tabuchi Masaaki) (60354239)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・グループリーダー (82108)	