

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560105

研究課題名(和文) NI 基単結晶超合金の超高温での等二軸引張・圧縮多軸クリープ疲労寿命評価法の開発

研究課題名(英文) Creep-Fatigue Life Estimation for Nickel Base Single Crystal Superalloy under Multiaxial Loading

研究代表者

坂根 政男 (Sakane, Masao)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：20111130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000 円、(間接経費) 1,260,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では発電用ガスタービン動翼用に使われるニッケル基単結晶超合金の多軸応力下でのクリープ疲労寿命評価法の開発を研究目的とした。900℃で引張・圧縮・繰返しねじりクリープ疲労試験を単結晶超合金の中空円筒試験片を用いて、多軸引張・圧縮のクリープ疲労試験を同十字型試験片を用いて実施した。ミーゼス型の相当応力を用いれば、多軸低サイクル疲労寿命を、繰返し速度で修正したミーゼス型の相当応力を用いれば、多軸クリープ疲労寿命を高精度で整理できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to develop a creep-fatigue life estimation method of nickel base single crystal superalloy for power generation gas turbines. Tension-torsion creep-fatigue tests using hollow cylinder specimens and biaxial tension-compression creep-fatigue tests using cruciform specimens were performed at 900°C. Mises equivalent stress correlated the multiaxial low cycle fatigue lives and the equivalent stress modified by testing frequency correlated the creep-fatigue lives within a small scatter band.

研究分野：材料力学

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：高温 低サイクル 疲労 多軸 超合金

1. 研究開始当初の背景

(1) 高効率の発電システムの構築が、多くのエネルギーを石油資源に依存する我国の安全保障や環境負荷低減の観点から最重要の課題となっている。これらに対応するため、高効率で変動負荷に機敏に対応できる発電システムとして、ガスタービンと蒸気タービンとを組合せた複合発電(コンバインドサイクル)の導入が進んでいるが、低環境負荷の観点からさらに高効率化を目指す必要がある。(2) 複合発電システムの一層の高効率化のためには、ガスタービンの燃焼温度を上昇させることが必要である。しかし、現状のガスタービン動翼材料に使用されているニッケル基の一方凝固超合金ではこれ以上の温度上昇は難しく、ニッケル基の単結晶超合金を使用する必要がある。

(3) 単結晶超合金をガスタービン動翼に使用した場合には、動翼外表面がもっとも厳しい使用条件となり、1,000 前後の温度で、等二軸圧縮保持を伴うクリープ疲労損傷を受けることが有限要素法解析から判明している。また、単結晶超合金は顕著な変形や強度の異方性を有していることから、単結晶超合金のこれらの異方性を考慮した高温構造設計が必要である。しかし、現状では、信頼できる単結晶超合金の多軸応力下でのクリープ疲労強度評価法は存在せず、単結晶超合金の動翼の導入に当たって開発を図る必要がある。

(4) 顕著な強度異方性を有する単結晶超合金を対象材料とした、多軸応力下でのクリープ疲労寿命評価法の研究は、国内外において中空円筒試験片を用いた引張・圧縮・繰返しねじの応力下で実施されてきている。しかし、この試験方法では実際のガスタービン動翼が受ける等二軸圧縮保持を伴うクリープ疲労損傷形態を再現することができず、等二軸引張・圧縮負荷の下での多軸高温クリープ疲労試験結果に基づく単結晶超合金の多軸クリープ疲労強度設計手法の開発が強く求められている。

2. 研究の目的

(1) 本申請の研究は、発電用ガスタービン動翼に使用されている Ni 基単結晶超合金の多軸応力下での高精度なクリープ疲労寿命評価法を動翼が実際に損傷を受ける状態を模擬する実験および解析的手法を用いて開発しようとするものである。

(2) 単結晶超合金 YH-61 の十字型試験片を用いて、実際にガスタービン動翼が受ける等二軸圧縮クリープ疲労試験を行い、単結晶超合金の多軸クリープ疲労強度を実験的に取得する。同クリープ疲労試験には、研究代表者らが開発した十字型試験片を用いる高温多軸クリープ疲労試験装置を用いる。本試験を通して、多軸クリープ損傷の主ひずみ比依存性やクリープ損傷を評価し、それらデータを

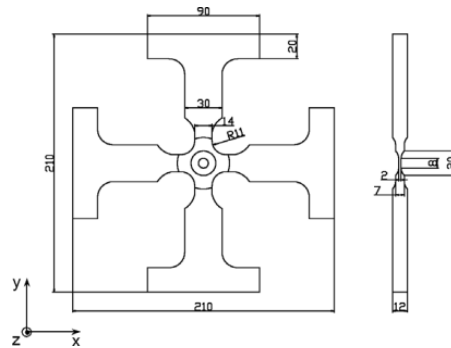


図1 十字型試験片の形状・寸法

解析することによって Ni 基単結晶超合金の多軸クリープ疲労損傷評価方を開発する。

3. 研究の方法

(1) 図1に形状・寸法を示すニッケル基単結晶超合金 YH-61 の十字型試験片を用いて、900 において相当ひずみ速度が 0.1%/s の三角波のひずみ波形を用いて高温低サイクル疲労試験を実施する。同図に示す形状全体を単結晶超合金で作成することは試験片の材料費が非常に高価となるため、試験片中央部の 90mm×90mm のみを単結晶超合金で作成し、4 本あるグリップ部分は多結晶鋳造合金の IN625 を TIG 溶接した試験片を用いる。なお、試験片の結晶方位が十字型試験片の標点部の応力振幅に大きな影響を及ぼすが、十字型試験片の4本のグリップ部の結晶方位が <110> 方位であれば、標点部中央での応力が最大となることを予め3次元の弾性有限要素法解析から確認しており、この方位の試験片を用いて実験を実施する。試験を実施する条件は、y 方向の最大主ひずみ(ϵ_y)を 0.6% で一定とし、主ひずみ比(ϕ)を変化させた実験を実施する。この試験を通して、低サイクル破損寿命の主ひずみ比依存性を得る。

(2) 次いで、試験片軸方向が <110> 方位の中実丸棒試験片を用いて単軸応力下での引張・圧縮低サイクル疲労試験を 900 で実施し、低サイクル破損寿命の全ひずみ範囲依存性を求める。(1)および(2)で得た両式を統合し、全ひずみ範囲や主ひずみ比が変化した場合の低サイクル破損寿命の評価式を作成する。この式による予測精度を確認するため、実験結果と同式で予測された破損寿命とを比較・検討する。

(3) 10分および30分の圧縮保持を伴うクリープ疲労試験を主ひずみ比 -1.0 ~ +1.0 900 で実施し、圧縮保持時間が単結晶超合金の低サイクル疲労寿命に及ぼす影響を定量化する。

(4) 上記の結果を統合し、Ni 基単結晶超合金の多軸クリープ疲労寿命評価方を開発する。

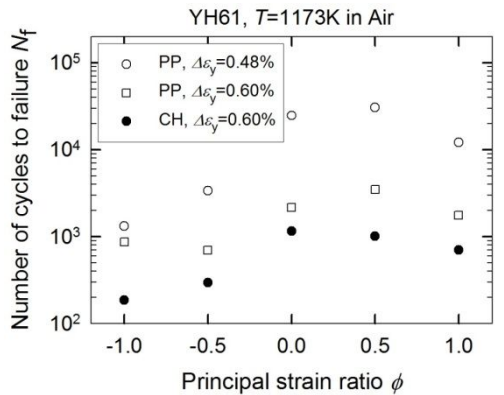


図2 多軸低サイクル疲労寿命の主ひずみ比依存性

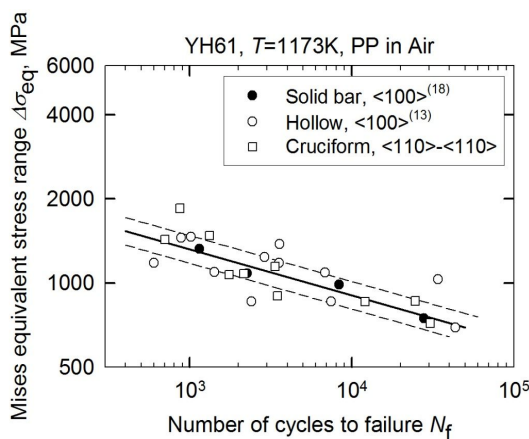


図3 ミーゼス型相当ひずみ範囲による多軸低サイクル疲労寿命の整理結果

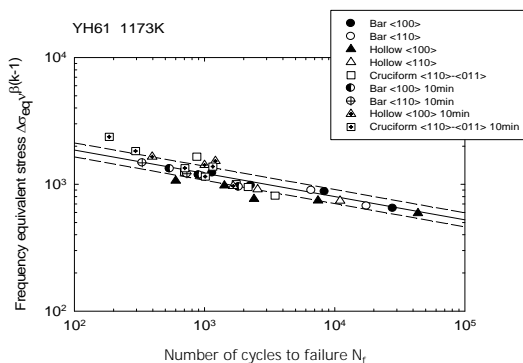


図4 ミーゼス型相当ひずみ範囲による多軸クリープ疲労寿命の整理結果

4. 研究成果

(1) 単結晶超合金の多軸低サイクル疲労寿命の及ぼす主ひずみ比の影響を考察するため、図1に示す YH-61 単結晶超合金の十字型試験片を用いて主ひずみ比が -1~1 の範囲で 900 において実施した、多軸低サイクル疲労試験結果 (PP) を図2に示す。なお、図2

には後述する多軸クリープ疲労試験結果についても記載してある (CP)。図からわかるように、y 軸方向のひずみが一定の低サイクル疲労試験においては、主ひずみが -1~0 の範囲においては主ひずみの増加に伴って破損寿命は増加するが、0~0.5 の範囲では一定値を取り、0.5~1 の範囲では減少することがわかる。また、10 分間のアッシュ比ひずみ保持とを伴うクリープ疲労寿命についても、低サイクル疲労寿命と同じ主ひずみ比依存性を示している。

(2) 低サイクル疲労破損寿命を統一的に整理するため、種々のひずみや応力パラメータの適用性を検討したが、最終的にはミーゼスの相当応力による整理が、もっともばらつき範囲が少ない整理結果が得られた。ミーゼス型の相当応力範囲による YH-61 単結晶超合金の低サイクル疲労寿命の整理結果を図3に示す。なお、図中には別途実施した中実丸棒試験片の引張・圧縮低サイクル疲労試験および中空円筒試験片の引張・圧縮 繰返しねじり低サイクル疲労試験結果も併記してある。図中の実践は中実丸棒試験片の引張・圧縮のデータを基準に引いたものであり、点線はその線からの係数 2 の範囲を指名している。図からわかるように、ミーゼス型の相当応力範囲を用いれば、単結晶超合金の図に示すような結晶方位の多軸低サイクル疲労寿命を整理することができる。なお、最大主ひずみ範囲やミーゼス型の相当ひずみ範囲を用いて同様の整理を試みたが、いずれも整理結果に大きなばらつきを生じた。この原因は、ひずみ範囲による整理では、弾性定数の異方性による応力振幅の違いを考慮に入れていないためである。弾性定数の異方性を考慮した、異方性ひずみ範囲による整理では、比較的ばらつき範囲が少なかった。

(3) 単結晶超合金の多軸クリープ疲労寿命評価では、上述した低サイクル疲労損傷にさらに、どのようにしてクリープ損傷を考慮するのかという点が課題となる。通常の耐熱鋼等のクリープ損傷は、クリープ破断データをもちいて時間損傷として考慮するのがほとんどである。しかし、単結晶超合金の場合には、クリープ破断時間が大きく結晶方位の影響と受けるため、種々の方位のクリープ破断データを基礎データとして取得する必要がある。この方法は、論理的ではあるものの、余り経済効率性が良いとは考えられない。これらのことから、本研究ではクリープ損傷は試験波形の周波数として考慮することにした。この方法では、クリープ損傷の結晶方位依存性を考慮する必要が無く、簡便であるという長所がある。

$$\Delta \sigma_{eq} v^{\beta(k-1)} N^{\beta} = C$$

本研究では、多軸クリープ疲労寿命を評価するため、上式を提案した。同式で σ_{eq} はミーゼス型の相当応力、 n は周波数、 N は破損線

返し数, β , k , C は材料定数である。上式を用いた単結晶超合金のクリープ疲労寿命整理結果を図 4 に示す。図中のデータの種類, 実線や点線の意味は, 図 3 で記述したものと同様である。図から分かるように, 上式は単結晶張合コンの多軸クリープ疲労寿命を係数 2 の範囲で整理することができるパラメータであることがわかる。この式を用いれば多軸クリープ疲労損傷を受ける発電用ガスタービンの動翼に使用されている単結晶超合金のクリープ疲労寿命を高精度で評価することができる。

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 14 件)

著者名: Masao Sakane, Shengde Zhang, Akira Yoshinari, Noriaki Matsuda, Nobuhiro Isobe, 論文標題: Multiaxial Low Cycle Fatigue for Ni-Base Single Crystal Super Alloy at High Temperature, 雑誌名: Advanced Materials Modeling for Structures, 査読: 有, 巻: 19, 発行年: 2013, ページ: 297-305,

DOI: 10.1007/978-3-642-35167-9_27

著者名: 中村寛, 高梨正祐, 伊藤隆基, 呉敏, 坂根政男, 論文標題: 非比例多軸負荷における負荷経路の可視化手法および設計手法の開発, 雑誌名: 日本機械学会論文集 A 編 (材料力学, 機械材料など), 査読: 有, 巻: 79, 第 798 号, 発行年: 2013, ページ: 198 - 208

著者名: 松田憲昭, 坂根政男, 堀智成, 能瀬篤志, 寄川盛男, 増野浩一, 磯部展宏, 吉成明, 論文標題: Ni 基単結晶超合金製十字型試験片による軸力 - 軸力組合せ負荷での多軸低サイクル疲労寿命評価, 雑誌名: 材料, 査読: 有, 巻: 61, No.8, 発行年: 2012, ページ: 704-711

著者名: 松田憲昭, 坂根政男, 大島裕司, 寄川盛男, 増野浩一, 磯部展宏, 吉成明, 論文標題: Ni 基単結晶超合金十字型試験片による高温多軸低サイクル疲労試験法開発, 雑誌名: 材料, 査読: 有, 巻: 60, No.12, 発行年: 2011, ページ: 1030-1137

著者名: 金 泰俊, 張 聖徳, 坂根 政男, 論文標題: 多軸応力下における改良 9Cr-1Mo 鋼切欠き材の低サイクル疲労寿命評価法, 雑誌名: 材料, 査読: 有, 巻: 60, 発行年: 2011, ページ: 803-810

著者名: Masao SAKANE, Shengde ZHANG, TeaJoon KIM, 論文標題: Notch Effect on Multiaxial Low Cycle Fatigue, 雑誌名: International Journal of Fatigue (Special Issue of 'Multiaxial Fatigue Models'), 査読: 有, 巻: 33, 発

行年: 2011, ページ: 959-968

著者名: Mineo Nozaki, Shengde ZHANG, Masao SAKANE, Kaoru Kobayashi, 論文標題: Notch Effect on Creep-Fatigue Life for Sn-3.5Ag Solder, 雑誌名: Engineering Fracture Mechanics (Special Issue Multiaxial Fracture), 査読: 有, 巻: 78, No.8, 発行年: 2011, ページ: 1794-1807

[学会発表](計 24 件)

発表者名: Wenzhu Wang, Masao Sakane, Takamoto Itoh, Akira Yoshinari, Nobuhiro Isobe, Noriaki Matsuda, 発表標題: High Temperature Multiaxial Creep-Fatigue Life Prediction for YH61 Nickel-Base Single Crystal Superalloy, 学会名等: 11th INTERNATIONAL FATIGUE CONGRESS(FATIGUE 2014), 発表年月日: 2014 年 3 月 3 日, 発表場所: Melbourne (Australia)

発表者名: Masao Sakane, Takahiro Katagi, 発表標題: Nonproportional Low Cycle Fatigue for Mod.9Cr-1Mo Steel, 学会名等: 7th International Conference on Low Cycle Fatigue(招待講演), 発表年月日: 2013 年 9 月 9 日, 発表場所: Aachen (Germany)

発表者名: Takamoto Itoh, Masao Sakane, 発表標題: Evaluation of multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading, 学会名等: The Tenth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture (ICMFF10), 発表年月日: 2013 年 6 月 5 日, 発表場所: 立命館大学朱雀キャンパス (京都府)

発表者名: Dan Jin, Wei Wang, Masao Sakane, 発表標題: Low cycle fatigue of Mod.9Cr-1Mo steel under multiaxial loading at high temperature, 学会名等: The Tenth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture (ICMFF10), 発表年月日: 2013 年 6 月 4 日, 発表場所: 立命館大学朱雀キャンパス (京都府)

発表者名: Masao Sakane, Yusuke Kitamura, Takamoto Itoh, Yuichi Irisawa, Takafumi Tsurui, Masaharu Fujiwara, Taejoon Kim, 発表標題: Development of Miniature Creep Testing for High Temperature Materials-Development of Testing Machine, 学会名等: 2nd International Conference SSTT "DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS BY SMALL PUNCH AND OTHER MINIATURE TESTING TECHNIQUES", 発表年月日: 2012 年 10 月 4 日, 発表場所: Ostrava (Czech)

発表者名: Takamoto Itoh, Yuichi Irisawa, Masao Sakane, Yusuke Kitamura, Takafumi Tsurui, Masaharu Fujiwara, Taejoon Kim, 発表標題: Development of Miniature Creep Testing for High Temperature Materials-Verification Testing, 学会名等: 2nd International Conference SSTT " DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS BY SMALL PUNCH AND OTHER MINIATURE TESTING TECHNIQUES ", 発表年月日: 2012 年 10 月 3 日, 発表場所 Ostrava (Czech)
発表者名: Noritake HIYOSHI, Takamoto ITOH and Masao SAKANE, 発表標題: Thermo-Mechanical Fatigue Life Evaluation for Sn-Pb and Sn-Ag Solders, 学会名等: European Microelectronics and Packaging Conference 2011, 発表年月日: 2011 年 9 月 14 日, 発表場所: Brighton (United Kingdom)

一般財団法人電力中央研究所・材料科学研究
所・特別契約研究員
研究者番号: 00454520

〔図書〕(計 2 件)

著者名: Masao Sakane, Isamu Nonaka, Takamoto Itoh, Noritake Hiyoshi, Mineo Nozaki, Akira Ueno, Takaei Yamamoto, Shengde Zahng, 出版社名: (公社) 日本材料学会, 書名: Factual Database on Tensile, Creep, Low Cycle Fatigue and Creep-fatigue of Lead and Lead-free Solders, Vol. ~ , 発行年: 2013 年, 総ページ数: 2354

著者名: 坂根政男 (編者), 伊藤隆基, 末松芳幸, 張聖徳, 濱田直巳, 旭由雅健, 元家勝彦, 山本隆栄, 出版社名: 丸善出版(株), 書名: 例題で学ぶ Marc 有限要素法解析入門, 発行年: 2011 年, 総ページ数: 225

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://research-db.ritsumei.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂根 政男 (SAKANE MASAO)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 20111130

(2) 研究分担者

張 聖徳 (ZAHNG SHENGDE)