

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560093

研究課題名（和文）

先進的 Ni 基単結晶超合金の十字型試験片を用いた多軸クリープ疲労寿命評価法の開発

研究課題名（英文）

Development of Multiaxial Creep-Fatigue Life Evaluation for Nickel-Base Single Crystal Superalloy Using Cruciform Specimen

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では Ni 基単結晶超合金の多軸クリープ疲労寿命評価法を開発した。1173K において、YH-61 の十字型試験片を用いて、圧縮の最大ひずみでの保持時間を伴う二軸引張・圧縮のクリープ疲労試験を実施した。クリープ疲労寿命に及ぼす応力多軸度の影響を考察するとともに、き裂が発生する結晶方位を実験的に求めた。併せて、単結晶の異方性を考慮した 3 次元の弾塑性有限要素解析を実施し、多軸応力下でのクリープ疲労寿命法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

A method of multiaxial creep-fatigue life evaluation was developed for Nickel-base single crystal superalloy in this study. Biaxial tension-compression creep-fatigue tests with hold-times at the compressive peak strain were performed using YH-61 cruciform specimen at 1173K. Effect of the stress multiaxiality on the creep-fatigue life was discussed and crystal direction of the crack initiation was obtained experimentally. In addition, three dimensional elastic-plastic finite element analyses with considering the anisotropy of single crystal were performed to develop the creep-fatigue life evaluation method under multiaxial stress states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：単結晶超合金，疲労，多軸応力，十字型試験片，高温

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，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，上記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（現状では第一段動翼の

入り口温度で 1500 程度)。しかし、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、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厳しい使用条件となり、900 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、異方性を考慮した高温構造設計が必要である。しかし、現在の所では、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

本申請の研究では、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損傷形態に極めて近い試験を行い、試験結果および有限要素法を用いた解析結果を結びつけることによって、単結晶超合金の多軸クリープ疲労強度評価法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、図 1 に形状を示す単結晶超合金 YH-61 の十字型試験片を用いた。同試験片は、標点部中央での応力が最大となるように 4 本のグリップ部の結晶方位が $\langle 110 \rangle$ 方位になるように設計されたものである。図 2 に、研究代表者らが開発した同試験片用の高温多軸クリープ疲労試験装置を示す。

まず、900 において二軸引張・圧縮の低サイクル疲労試験を主ひずみ比 ($\phi = \epsilon_3 / \epsilon_1$; ϵ_1 : 最大主ひずみ, ϵ_3 : 最小主ひずみ) が $-1 \sim +1$ の条件下で実施し、低サイクル疲労寿命の主ひずみ比依存性、 $N_f = N_{f0} g(\phi)$ を得る。ここで、 N_{f0} は単軸応力下での破損寿命であり、 $g(\phi)$ は本研究で求める破損寿命の主ひずみ比依存性を表示する関数である。

(2) 次に、10 分の圧縮保持を伴うクリープ疲労試験を主ひずみ比が $-1 \sim +1$, 900 で

実施する。この試験を通じて、圧縮保持時間が疲労寿命に及ぼす影響を定量化し、次の式で示す関係を得る。

$$N_f = N_{f0} g(\phi) t_H^n \quad (1)$$

ここで、 t_H^n は圧縮保持時間である。

(3) 試験片軸方向が $\langle 100 \rangle$ および $\langle 110 \rangle$ 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を実施し、破損寿命のひずみ範囲依存性を、 $N_{f0} = A \Delta \epsilon^n$ の関係として得る。上述した式(1)および方位依存性を考慮して、多軸クリープ疲労寿命の評価式を以下のように提案する。

$$N_f = A \Delta \epsilon^n f(\alpha) g(\phi) t_H^n \quad (2)$$

ここで、 $f(\alpha)$ は低サイクル疲労寿命の補遺依存性関数である。

(4) 引張・圧縮の低サイクル疲労およびクリープ疲労の中断実験を実施し、き裂が発生する結晶方位を求める。

(5) 単結晶超合金の弾性定数の異方性を考慮した 3 次元の有限要素解析を行う。すなわち、Hill の異方性を考慮した弾塑性クリープ解析を実施し、(1)および(2)で得られた実験結果を合理的に説明できる破損パラメータを提案する。さらに、き裂発生箇所が特定できるき裂発生のカリテリオンを開発する。

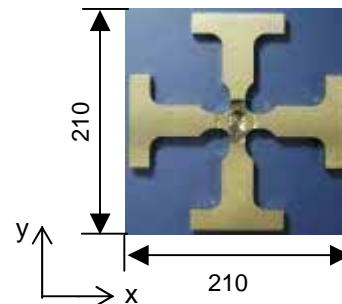


図 1 十字型試験片の形状写真

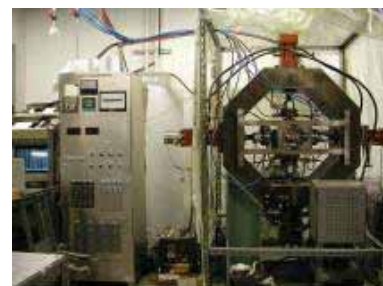


図 2 4つの独立した油圧アクチュエータを備えた十字型試験片用の高温多軸クリープ疲労試験装置

4. 研究成果

(1) 単結晶超合金の破損寿命

図3に、主ひずみ比の増加に伴う十字型試験片の低サイクル疲労(PP)およびクリープ疲労寿命(CH)の変化を示す。最大主ひずみ範囲が一定の試験においては、破損寿命は主ひずみ比(ϕ)の増加に伴って変化した。-1.0 ϕ 0の範囲までは大きく増加したが、0 ϕ 0.5の範囲においてはわずかに増加した。一方、0.5 ϕ 1の範囲では、破損寿命が少し減少する傾向を示した。同図から破損寿命の主ひずみ比依存性を下記の式のように提案した。

$$\log(N_f) = \log(N_{f0})(-0.6\phi^2 + 0.6\phi + 0.45) \quad (3)$$

これまで、中空円筒試験片を用いた方法は、-1.0 ϕ -0.5までの結果しかなかったが、本研究で提案した式(3)により、-1.0 ϕ 1のすべての範囲での寿命傾向を把握することができ、実機ガスタービンの設計における重要な参考基準になると思われる。

また、すべての主ひずみ比の範囲で、10分間のひずみ保持を伴うクリープ疲労寿命は、低サイクル疲労寿命に較べて短かった。ひずみ保持に伴う寿命低下は、保持期間中のクリープ損傷に起因すると考えられる。

(2) 単結晶超合金のクリープ疲労寿命評価

図4に、ひずみ基準のMises型の相当ひずみ範囲による低サイクル疲労寿命の整理結果を示す。図中の実線は軸方向が<100>方位の中実丸棒試験片を用いた単軸データを基準に引いたものであり、両側の点線は係数2のばらつき範囲を示す。軸方向が<110>方位の単軸疲労寿命は、<100>のそれより小さく短寿命側に整理された。十字型試験片の場合は、主ひずみ比によって破損寿命が異なり、データのばらつきが大きかった。

本研究では、Hillの異方性を考慮した弾塑性解析を実施し、Mises型の相当応力を求め、上記の寿命の整理を試みた。図5に、Mises型の相当応力範囲による寿命整理結果を示す。同図からわかるように、すべてのデータが係数2の範囲内に整理された。このことは、Mises型の相当応力範囲を用いれば、中実丸棒試験片の引張・圧縮の結果から十字型試験片で得られた寿命を精度良く評価することが可能であることを示唆している。

図6に、Mises型の相当応力範囲によるクリープ疲労寿命の整理結果を示す。図5の低サイクル疲労寿命結果と同様、十字型試験片のデータはすべて係数2の範囲内に整理された。

以上のことから、実機ガスタービンの設計において、Mises型の相当応力基準を用いれば高精度な寿命評価が可能であることが

わかった。これは世界で初めてMises型の相当応力の有用性を実証したものであり、産業界だけでなく、学術分野にも大きなインパクトを与えると確信できる。

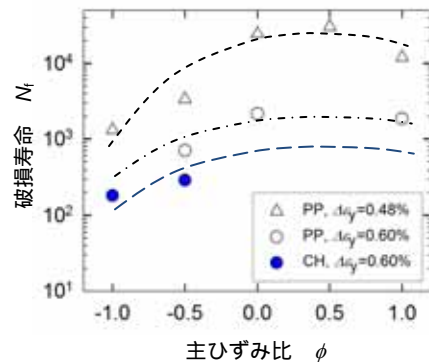


図3 破損寿命の主ひずみ比依存性

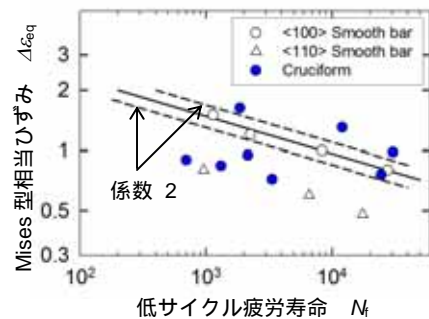


図4 Mises型相当ひずみによる寿命整理

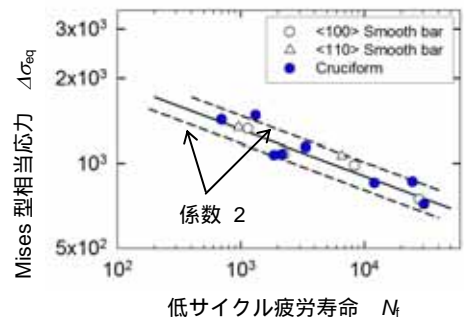


図5 Mises型の相当応力による寿命整理

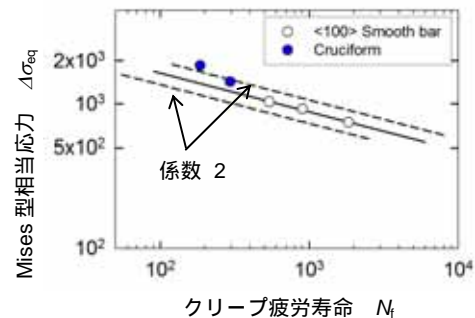


図6 Mises型の相当応力による寿命整理

(3) 単結晶超合金のき裂発生クライテリオン

図7に、低サイクル疲労およびクリープ疲労試験で観察された破損時の代表的な表面き裂観察写真を示す。 $\phi=-1.0$ の低サイクル疲労試験では、 x 軸および y 軸にほぼ垂直方向のき裂が観察されたが、 $\phi=0.5$ ではほとんどのき裂が y 軸に垂直な方向に伝ばしていた。主ひずみ比の異なることによって、表面き裂の進展方向が大きく変わることがわかる。 $\phi=-1.0$ では最大主ひずみ方向が x 軸および y 軸方向、 $\phi=0.5$ でのそれは y 軸方向であることから、すべてのき裂が最大主ひずみ面で進展していることが分かる。

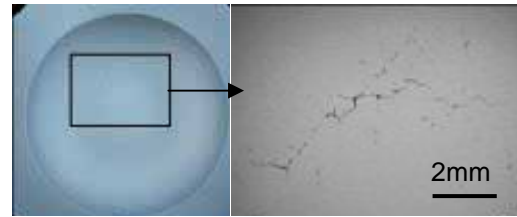
一方、 $\phi=-1.0$ の圧縮ひずみ保持を伴うクリープ疲労試験では、主き裂以外に微小なき裂が標点部上部に複数観察された。これは、ひずみ保持によるクリープ損傷の影響であると考えられる。また、き裂の拡大写真では、ほとんどのき裂が十字型に入っており、主ひずみ方向 x 軸および y 軸と垂直な方向にき裂が進展していることがわかる。クリープ疲労試験においては、微小なき裂が多数発生していることが破損の主要な要因であると考えられる。また、主き裂および微小き裂の伝ば方向は主ひずみ方向と垂直であることがわかった。

(4) 研究成果の位置付けおよび今後の展望

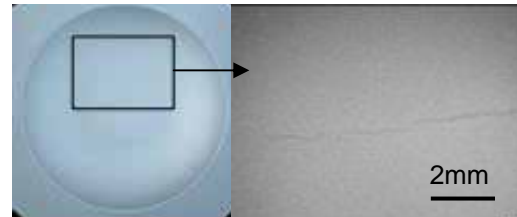
本研究では、主な研究成果として、広範な多軸応力範囲におけるクリープ疲労寿命の主ひずみ比依存性の解明、多軸応力下での単結晶超合金の寿命評価法の開発、単結晶超合金のクリープ疲労き裂発生挙動の解明が挙げられる。

この研究成果は、実機ガスタービンの設計における重要な参考基準になるとともに、高精度な寿命評価に大きく寄与できると確信している。また、多軸応力下での材料変形・破壊特性の解明の学術分野にも大きなインパクトを与えると確信できる。

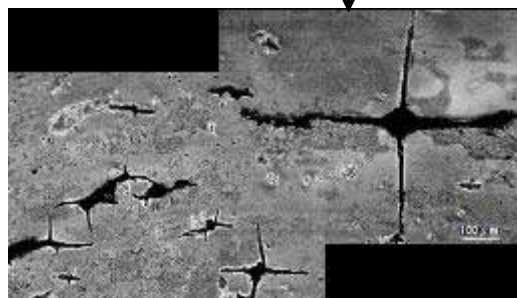
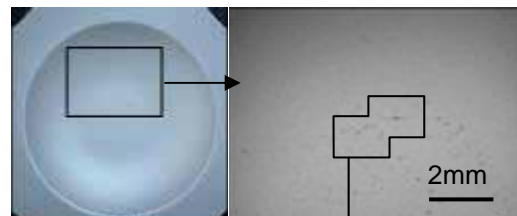
しかし、得られたクリープ疲労寿命の主ひずみ比依存性と提案した多軸応力下での寿命評価パラメータの関連性については必ずしもはっきりしてなかった。また、き裂発生・進展に及ぼす結晶方位の影響についても明確な結論までは至ってなかった。したがって、今後、クリープ疲労寿命の主ひずみ比依存性とMises型の相当応力と関連性を明確にするとともに、ひずみ基準の寿命評価パラメータの開発が課題となっている。また、単結晶超合金のクリープ疲労き裂発生・進展のメカニズムを明らかにし、寿命評価との相関性についても検討する必要があると考えられる。



(a) 低サイクル疲労, $\Delta\epsilon_c=0.6\%$, $\phi=-1.0$



(b) 低サイクル疲労, $\Delta\epsilon_c=0.6\%$, $\phi=0.5$



(c) クリープ疲労, $\Delta\epsilon_c=0.6\%$, $\phi=-1.0$

y ↑
→ x

図7 代表的な破損時の表面き裂写真

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18件)

金 泰俊, 張 聖徳, 坂根政男, 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, 材料, 掲載決定 (2011年発行予定), 査読有。

Masao Sakane, Shengde Zhang, TeaJoon Kim, Notch Effect on Multiaxial Low Cycle Fatigue, International Journal of Fatigue, Vol.33, No.8, 2011-8, pp.959-968, 査読有。
鶴来昌樹, 松田憲昭, 坂根政男, 大畠裕司, 磯部展宏, 吉成 明, 寄川盛夫, 増野浩一, Ni 基単結晶超合金の多軸応力場における

非弾性解析, 材料, Vol.60, No.2, 2011-2, pp. 94-101, 査読有.

伊藤隆基, 坂根政男, 尾崎智彦, 多軸応力下でのひずみおよび応力範囲の定義法 - 比例および非比例負荷 -, 材料, Vol.60, No.2, 2011-2, pp.88-93, 査読有.

金 泰俊 張 聖徳 坂根政男 改良 9Cr-1Mo 鋼環状切欠き材の非比例多軸低サイクル疲労寿命, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.768, 2010-8, pp. 1059-1067, 査読有.

Shengde Zhang, Takashi Wakai and Masao Sakane, Creep Rupture Life and Damage Evaluation Under Multiaxial Stress State for Type 304 Stainless Steel, Materials Science and Engineering A, Vol.510-511, pp.110-114, 2009-6, 査読有.

Kwang Soo Kim, Rong Jiao, Xu Chen and Masao Sakane, Ratcheting of Stainless Steel 304 under Multiaxial Nonproportional Loading, Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.131, No.4, pp. 021405-1- 021405-8, 2009 -4, 査読有.

寄川盛男 松田憲昭 坂根政男 磯部展宏, 鶴来昌樹, 吉成 明, Ni 基単結晶超合金の引張・圧縮—繰返しねじり負荷での多軸低サイクル疲労寿命評価, 材料, Vol.58, No.2, 2009-2, pp. 149-154, 査読有.

[学会発表](計 36 件)

発表者名: 渡辺祐樹. 発表題目: 改良 9Cr-1Mo 鋼環状切欠き材の非比例多軸低サイクル疲労寿命評価, 日本材料学会第 48 回高温強度シンポジウム, 2010 年 12 月 2 日, 高知城ホール (高知県).

発表者名: Shengde Zhang, 発表題目: Nonproportional Low Cycle Fatigue Life of Inconel718 Superalloy at Elevated Temperatures, 7th China-Japan Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials, 2010 年 8 月 23 日, Dalian(China).

発表者名: Keisuke Abe, 発表題目: Multiaxial Creep Lifetime Assessment Using Cruciform Specimen of Type 304 Stainless Steel, 3rd German-Japanese Symp. on Nanostructures, 3rd International Symp. on Nanostructures, 2010 年 2 月 28 日, Olpe(Germany).

発表者名: 真崎達也, 発表題目: マルエージング鋼の非比例多軸低サイクル疲労寿命, 日本材料学会第 59 期学術講演会, 2010 年 5 月 22 日, 札幌コンベンションセンター (北海道).

発表者名: 阿部圭介, 発表題目: SUS304 鋼十字型試験片を用いた高温多軸クリープ寿命評価, 日本材料学会第 47 回高温強度シンポジウム, 2009 年 12 月 3 日, 別府

国際コンベンションセンター (大分県). 発表者名: 張 聖徳, 発表題目: Mod.9Cr-1Mo 鋼環状切欠き材の非比例多軸低サイクル疲労寿命, 日本材料学会第 58 期学術講演会, 2009 年 5 月 23 日, 愛媛大学 (愛媛県).

発表者名: 張 聖徳, 発表題目: SUS304 鋼十字型試験片を用いた高温多軸クリープ変形特性および寿命評価, 日本材料学会第 46 回高温強度シンポジウム, 2008 年 12 月 4 日, 登別グランドホテル・コンベンションホール (北海道).

発表者名: Masao Sakane, 発表題目: Low Cycle Fatigue and Creep Testing Using Miniature Specimen, 5th International Conference on Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction, 2008 年 9 月 24 日, Kalpakkam (India).

発表者名: 金 泰俊, 発表題目: 改良 9Cr-1Mo 鋼環状切欠き材の非比例多軸低サイクル疲労寿命, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 16 日, 立命館大学 (滋賀県).

発表者名: 磯部展宏, 発表題目: Ni 基単結晶超合金の引張圧縮 - 繰返しねじり条件下での高温多軸低サイクル疲労寿命評価, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 16 日, 立命館大学 (滋賀県).

[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)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号: 00454520

(3)連携研究者

吉成 明 (YOSHINARI AKIRA)
株式会社日立製作所・日立研究所・
主管研究員
研究者番号: 90505645