

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420028

研究課題名(和文) ガスタービン用先端Ni基単結晶超合金翼の高温多軸クリープ疲労設計手法の開発

研究課題名(英文) Development of a Design Method for Advanced Ni-base Single Crystal Superalloy Blades in Gas Turbines

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ガスタービン動翼に使用されているニッケル基単結晶超合金の多軸応力下におけるクリープ疲労寿命評価法について検討した。等二軸引張・圧縮および繰返しねじり負荷の下でクリープ疲労寿命を求め、ニッケル基単結晶超合金の多軸負荷の下でのクリープ疲労寿命評価法を提案した。この手法を用いて、実ガスタービン翼の信頼性評価法についての一提案を行った。具体的には、有限要素法解析を用いて実働状態でのガスタービン動翼のミーゼス型相当応力の時間履歴を求める。求めた相当応力振幅および周波数から疲労損傷およびクリープ損傷を評価するものである。

研究成果の概要(英文)：This study discussed the creep-fatigue life evaluation method for a nickel base single crystal superalloy used in a gas turbine blade. A creep-fatigue life evaluation method was proposed by analyzing the tension-torsion creep-fatigue data and equi-biaxial tension creep-fatigue data. Using the proposed method, a quality assurance method of actual gas turbine blade was developed. The method is to calculate the variation of von Mises stress with time on the critical points of actual gas turbine blades, and the fatigue damage was evaluated by the stress amplitude and creep damage by the frequency of the von Mises stress waveform.

研究分野：材料力学

キーワード：低サイクル疲労 高温 クリープ疲労 単結晶 超合金

1. 研究開始当初の背景

ニッケル基単結晶超合金は、航空機や発電用ガスタービン動翼に使用される特殊な合金である。単結晶超合金は顕著な異方性を有しており、また同動翼は多軸負荷を受けるため、ガスタービンの信頼性評価のためには、単結晶超合金に対する多軸応力下でのクリープ疲労寿命評価法の開発が必要とされてきた。

2. 研究の目的

本研究では、低環境負荷の発電システムである複合発電に使用されている発電用ガスタービンの信頼性評価と高効率化を目指して、第一段動翼に使用されているニッケル基単結晶超合金翼の実使用状態での多軸クリープ疲労設計手法を開発する。とくに、ガスタービン翼が実使用状態で受ける等二軸の引張・圧縮の多軸クリープ疲労損傷下での疲労設計手法を開発する。

3. 研究の方法

(1)ニッケル基単結晶超合金の中空円筒試験片を用いて、引張・圧縮 繰返しねじりの多軸低サイクル疲労試験を 900 において実施した。その際、結晶方位が多軸低サイクル疲労寿命に及ぼす影響を考察するため、試験片軸方向が<100>および<110>の2種類の試験片を用いた。ひずみ波形としては、完全両振り対称三角波および保持時間が 10 分~30 分の台形波形を用いた。2 種類の試験片軸方位が異なる試験片を用いて、引張・圧縮、繰返しねじりおよび両者の複合負荷下での低サイクル疲労試験を実施し、疲労寿命を求めた。  
(2)試験片軸方向が<110>の十字型試験片を用いて、900 において等二軸引張・圧縮の低サイクル疲労試験を実施した。用いたひずみ波形は、完全両振り対称三角波および最大圧縮時に 10 分~30 分のひずみ保持を伴う台形波形である。両波形を用いて低サイクル疲労試験を実施し、クリープ疲労寿命を求めた。

4. 研究成果

(1)引張・圧縮 繰返しねじり多軸低サイクル疲労寿命は大きく、試験軸方向結晶方位および多軸度を表す主ひずみ比の影響を受けた。従来、多軸低サイクル疲労寿命評価パラメータとして使用されてきたミーゼス型の相当ひずみを用いて多軸低サイクル疲労寿命を整理した結果、繰返しねじり成分の多い試験条件のものほど、低寿命側に整理された。また、保持時間を伴う台形波での低サイクル疲労寿命は、保持時間を伴わない三角波での低サイクル疲労寿命に比べて大きく減少することが明らかになった。ガスタービン動翼の信頼性評価のためには、試験片の結晶方位、多軸度および保持時間の三者を考慮することが明らかになった。  
(2)十字型試験片を用いた多軸低サイクル疲労試験では、低サイクル疲労寿命は大きく主

ひずみ比の影響を受けた。しかも、多軸低サイクル疲労寿命は主ひずみ比の増加に伴い単調に増加するのではなく、主ひずみ比が-1から0の範囲までは増加したが、それ以降の主ひずみ比の増加に伴っては、大きく変動しなかった。また、保持時間の増加に伴って大きく低サイクル疲労寿命が低下した。

(3)中空円筒試験片を用いた多軸低サイクル疲労寿命および十字型試験片を用いた多軸低サイクル疲労寿命を統一的に整理する方法を考察した。ミーゼス型の相当ひずみ範囲では両試験法による多軸低サイクル疲労寿命を整理することができなかった。その他のひずみパラメータを用いた整理も試みたが、いずれのひずみパラメータもニッケル基単結晶超合金の多軸低サイクル疲労寿命を整理することができなかった。

(4)ひずみパラメータでニッケル基単結晶超合金の多軸低サイクル疲労寿命を整理することができなかったことから、破損寿命の負荷応力依存性の面から考察した。多軸低サイクル疲労寿命の大小関係は負荷応力の大小関係と密接に関連していた。そこで、ミーゼスの相当応力で中空円筒試験片および十字型試験片の多軸低サイクル疲労寿命を整理した結果、両破損寿命を統一的に整理することができた。したがって、ニッケル基単結晶超合金の多軸低サイクル疲労寿命は負荷応力に依存することが判明した。

(5)多軸応力下でのクリープ損傷を評価するためには、従来、時間消耗則によると、引張クリープ試験を種々の結晶方位について実施し、各方位についての応力-クリープ破断時間線図を作成する必要がある。同応力-クリープ破断時間線図を用いて、クリープ疲労波形でのクリープ損傷を時間消耗則で求める必要がある。各結晶方位でのクリープ破断時間を求めるのは、長い時間と大きな経費を要するため、実質的には困難である。したがって、ニッケル基単結晶超合金の多軸クリープ損傷を時間消耗則で評価するのは現実的に不可能である。

(6)クリープ損傷を時間消耗則以外の方法で評価する方法として、負荷波形の周波数を用いる方法を検討した。負荷波形の周波数を用いてクリープ疲労負荷におけるクリープ損傷を評価できることを明らかにした。最終的に、次式で示さ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式を提案した。

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

ここで、 $\Delta\sigma_{eq}$  はミーゼス型の相当応力範囲、 $v$  はひずみ波形の周波数、 $N_f$  は破損繰返し数、 $\beta$ 、 $C$ 、 $k$  は材料定数である。

(7) 実ガスタービン翼のクリープ疲労寿命評価法について検討した。図1のガスタービン翼の模式図に示すように、近年のガスター

ピン翼は内部冷却構造をしている。したがって、ガスタービン翼で最も過酷な高温でのクリープ疲労損傷を受けるのは、ガスタービン翼外表面となる。ガスタービンの起動停止に伴って、ガスタービン翼外表面は図2に示すように、疲労損傷 ( $\tau_0$ ) を受け、定常運転中にはひずみ保持時のクリープ損傷 ( $\tau_c$ ) を受ける。しかも、等二軸圧縮負荷に近い多軸応力状態でのクリープ損傷を受ける。

実ガスタービン翼の信頼性評価法としては、まず、ガスタービン翼の起動・定常運転・停止過程について有限要素法解析による応力解析を行う。その際、弾性クリープ解析を用い、弾性解析には弾性定数の異方性を考慮し、クリープ解析には異方性を考慮しない。クリープ解析に異方性を考慮しない点は誤差要因となる可能性があるが、現時点ではニッケル基単結晶材料のクリープ変形に適用できる異方性を考慮した構成式が開発されていないため、認めざるを得ない誤差要因として受け入れる以外に方法はない。有限要素法解析を通して、単結晶翼の最も疲労損傷やクリープ損傷の大きいと想定される点での図2に示すミーゼス型相当応力波形を求める。

有限要素法解析から求めた応力波形からミーゼス型の最大相当応力範囲および周波数を求め、それらを図3に示す予め求めておいたニッケル基単結晶材料のクリープ疲労寿命線図に当てはめることによって、実ガスタービン翼の多軸応力下でのクリープ疲労寿命を推定することができる。なお、より精密には、試験片サイズの破損繰返し数と実ガスタービン翼のサイズとは異なっているため、き裂発生寿命やき裂進展速度の視点からの考察が今後の検討課題である。

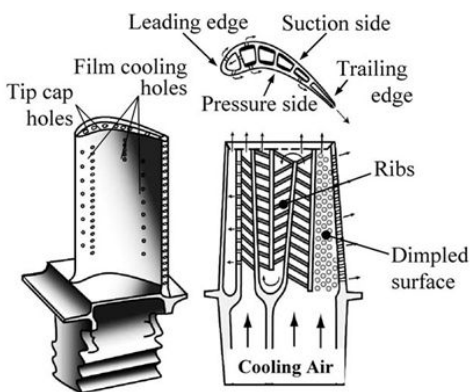


図1 実ガスタービン翼の模式図

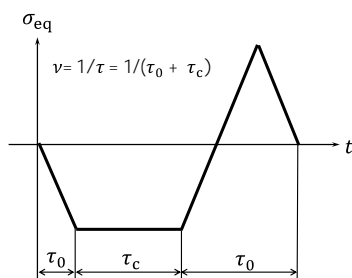


図2 ガスタービン翼が受けるひずみ波形

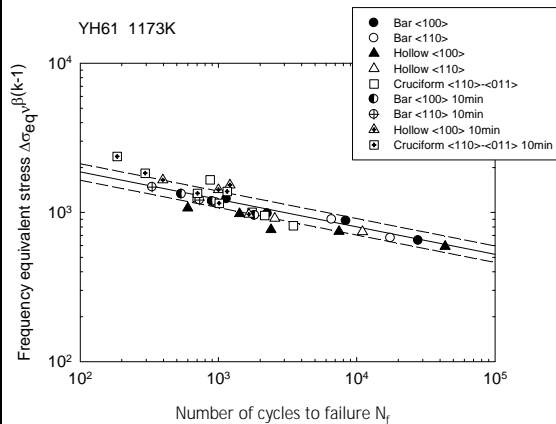


図3 ニッケル基単結晶超合金の式(1)による寿命整理結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

坂根政男, 低サイクル疲労およびクリープに及ぼす多軸応力の影響, 材料, 査読有, Vol. 66, No. 2, 2017, 70-79

Fumio Ogawa, Hiroki Nagao, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Mitsuo Yamashita, Hiroaki Hokazono, Creep characteristic of Sn1.0Ag0.7Cu lead-free solders with element addition, Applied Mechanics and Materials (SI: Innovation in Testing and Evaluation of Structural Integrity), 査読有, Vol. 853, 2017, 192-196, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.853.192

Takahiro Morishita, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Development of bending and torsion fatigue testing machine for multiaxial non-proportional loading, Applied Mechanics and Materials (SI: Innovation in Testing and Evaluation of Structural Integrity), 査読有, Vol. 853, 2017, 534-538, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.853.534

Takahiro Morishita, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Hiroshi Nakamura, Masahiro Takanashi, Multiaxial fatigue property of Ti-6Al-4V using hollow cylinder specimen under push-pull and cyclic inner pressure loading, International Journal of Fatigue, 査読有, Vol. 87, No. 6, 2016, 370-380, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2016.02.019

坂根政男, 伊藤隆基, 伝承すべき高温材料試験とその現状 - 3. 多軸クリープ疲労試験とその試験技術, 材料, 査読有, Vol. 64, No. 12, 2015, 1047-1052,

Masao Sakane, Takamoto Itoh and Hideyuki Kanayama, Effect of multiaxial stress on low cycle fatigue, Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Reviews, 査読有, Vol. 2, No. 1, 2015, DOI: 10.1299/mer.14-00214

Naomi Hamada, Masao Sakane, Takamoto Itoh, Hideyuki Kanayama, High temperature nonproportional low cycle fatigue using fifteen loading paths, Theoretical and Applied Fracture

Mechanics, 査読有, Vol. 73, 2014, 136-143,  
DOI: 10.1016/j.tafmec.2014.07.006

濱田直巳, 坂根政男, 元家勝彦, 梅田洋,  
SUS316FR 鋼を用いた環状切欠き材の低サイ  
クル疲労寿命に及ぼす応力波形の影響と簡  
易寿命推定, 材料, 査読有, Vol. 63, No. 9,  
2014, 647-654

〔学会発表〕(計9件)

Hiroki Kobayashi, Ryohei Ohki, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Biaxial and triaxial creep damage evaluation for type 304 stainless steel, 11th Int. Conf. on Multiaxial Fatigue & Fracture (ICMFF11), 2016年6月1日, Seville (Spain)

長尾裕貴, 伊藤隆基, 坂根政男, 山下満男,  
外園洋昭, SnAgCu系はんだのクリープ強度  
に及ぼす添加元素の影響, 日本材料学会第64  
期学術講演会, 2015年5月23日, 山形大学(山  
形県米沢市)

Masao Sakane, Multiaxial low cycle fatigue of  
nickel base single crystal superalloy(招待講演),  
The Fifth International Symposium on Structural  
Integrity (ISSI2015), 2015年5月17日,  
Shenyang (China)

Masao Sakane, Mineo Nozaki, Takamoto Itoh,  
Takafumi Tsurui, Low cycle fatigue testing using  
miniature specimens (Plenary lecture), ESIS  
TC-10 Workshop on Environmentally Assisted  
Cracking & Hydrogen Embrittlement, 2015年4  
月27日, Zamora (Spain)

Masao Sakane, Takamoto Itoh, Microstructural  
study of multiaxial low cycle fatigue, First  
International Workshop on Challenges in  
Multiaxial Fatigue, 2015年4月23日, Urbino  
(Italy)

Takamoto Itoh, Takairo Morishita, Masao Sakane,  
Evaluation and visualization of  
multiaxial stress and strain states under  
non-proportional loading, First International  
Workshop on Challenges in Multiaxial Fatigue,  
2015年4月22日, Urbino (Italy)

坂根政男, 高温材料強度の最前線, 将来加  
工技術第136委員会創設50周年記念シンポ  
ジウム, 2014年11月28日, ホテルグランビ  
ア京都(京都府京都市)

坂根政男, ミニチュア試験片を用いたクリ  
ープおよび低サイクル疲労試験, エネルギー  
イノベーション材料研究センター第1回シン  
ポジウム, 2014年11月15日, 立命館大学(滋  
賀県草津市)

Masao Sakane, Creep and low cycle fatigue  
testing using miniature specimens (Keynote),  
2014 International Symposium on Structural  
Integrity-Structural Integrity Solutions, 2014年8  
月21日, Lanzhou (China)

〔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

伊藤 隆基 (ITOH, Takamoto)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40242581