

平成 21 年 5 月 17 日現在

研究種目：若手研究スタートアップ  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19860036  
 研究課題名（和文） 超合金組織の形態変化を応用したタービン翼稼働力学場の検出と寿命延伸技術への展開  
 研究課題名（英文） Gas Turbine's In-service Stress Detection based on Microstructural Changes of Single Crystal Ni-Base Superalloy.  
 研究代表者  
 阪口 基己 (SAKAGUCHI MOTOKI)  
 長岡技術科学大学・工学部・機械系・助教  
 研究者番号：60452083

## 研究成果の概要：

本研究では、優れた高温強度を持つ単結晶 Ni 基超合金の組織形態変化現象に焦点を当て、その現象を意図的に発現させる実験を様々な条件下で行うとともに、発現した組織変化を数的表示するための評価法の開発、現象を支配する駆動力とメカニズムの解明を通し、形態変化現象を積極的に利用した「ガスタービン高温部材の寿命延伸技術」の根幹を担う基礎的事象を学術的に明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,340,000	0	1,340,000
2008 年度	1,340,000	402,000	1,742,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,680,000	402,000	3,082,000

研究分野：高温材料強度学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：Ni 基超合金、自己組織化、モニタリング、寿命延伸、残留応力

## 1. 研究開始当初の背景

エネルギー資源の節約、CO<sub>2</sub>削減等の社会的・工業的要求から、超高温・高熱効率で稼働する産業用ガスタービンの研究開発が先進各国で進められており、国家戦略物資にもなっている。近年のタービン開発では、高温・高効率化と同時に運転コストの低減および安全性・信頼性向上も重要なファクターになっており、過酷な高温高圧環境におかれる動翼部材の稼働温度・力学状態の検出技術、正確な余寿命評価法、さらには、同部材の寿命延伸技術の開発が強く求められている。

現在、先進タービンの動翼には、結晶制御により強化された単結晶 Ni 基超合金（以下、単に超合金と呼ぶ）が用いられているが、超合金は優れた高温強度を持つ耐熱材料であると同時に、力学的環境に依存して組織形態がさまざまなかたちに変化し、その形態により材料強度が上昇・低減するという特徴もあわせ持つ。

$\gamma/\gamma'$  組織の形態変化としてはクリープ過程に生じるラフティング現象が広く知られているが、申請者は近年の研究により、  
 ・単純な引張・圧縮負荷や疲労負荷が加わった場合にも、負荷の大きさ・履歴に依存し

た組織形態変化が生じること、  
・その形態変化は超合金の高温強度に影響を与え、形態によってはクリープ強度、疲労強度が上昇する場合もあることを実験的・解析的に明らかにしてきた。これらの結果は、超合金の組織形態変化を通じ材料がおかれた温度・力学場が予測可能であることを意味しており、それを応用したタービン動翼の実機稼働応力・ひずみ場の検出、さらには、その検出結果を利用した部材の寿命延伸技術に繋がるという着想に至った。

## 2. 研究の目的

上述の背景のもと、本研究では超合金組織の特性を積極的に利用した「タービン動翼の実機稼働力学状態の検出技術」、ならびに、「動翼の寿命延伸技術」の開発を目指し、その根幹を担う基礎的事象を学術的観点から明らかにすることを目的とした。特に、

- (1) 複雑なタービン実機稼働条件に対応させるため、静的な単軸負荷だけでなく、複雑な多軸負荷状態、疲労負荷状態下での組織形態変化について、基礎実験データを取得し、種々の負荷レベル、残留応力状態、温度条件により生じる組織形態変化をデータベース化する。
- (2) 組織形態から稼働力学場を予測するための定量モデルを構築し、「温度・力学場—組織形態変化」マップを作成する。
- (3) 種々の負荷条件において優れた強度を発揮する組織形態について実験的・解析的に探求し、最適組織形態決定のための「温度・力学条件—最適組織形態」マップを作成することに焦点を当てた。

## 3. 研究の方法

### (1) 各種温度・力学条件化での組織形態変化のデータベース化

引張・圧縮の単軸負荷、ねじり負荷、多軸負荷等の様々な負荷による塑性変形と負荷を与える際の温度環境が超合金組織の形態変化に与える影響を実験的に検討した。また、これらの静的負荷に加え、高温でのクリープ疲労、低サイクル疲労、および、熱機械疲労といった動的負荷の影響についても検討し、各条件下での組織形態変化のデータベースを作成した。

### (2) 組織形態の定量評価法の開発

組織形態の変化を定量的に表す手法として、結晶粒度測定に用いられるインターセプト法を応用した評価法、ならびに、フラクタルを基にした Cluster-Method を独自に開発し、両手法を用いた組織形態の定量評価を行

った。

### (3) 組織形態変化現象のメカニズムの解明

上記項目(1)にて観察された組織形態変化のメカニズムを解明するため、有限要素法を用いた弾粘塑性解析、マイクロメカニクスに基づいたポテンシャルエネルギー計算を行った。それらの解析結果と項目(2)にて得られた結果と照合し、組織変化を引き起こす駆動力について定量評価を行った。

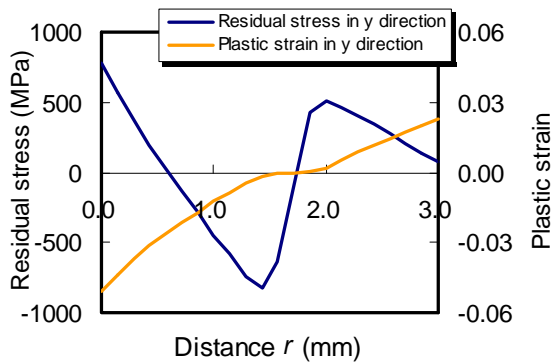
## 4. 研究成果

本研究では、まず、塑性予ひずみとその後の熱処理により生じる超合金組織の形態変化現象に注目し、塑性予ひずみの大きさ・方向・履歴、予ひずみを与える際の温度、ならびに予ひずみにより生じる残留応力の影響について実験的に検討した。その結果、組織変化はひずみを与える際の温度に強く依存し、温度が高いほど組織変化の程度が顕著になること、予ひずみにより残留応力場が形成された場合は、ひずみと残留応力両方の大きさ・方向に依存し、その依存の度合は温度によって変化することを明らかにした。つぎに、ガスタービン実機稼働環境に近い、高温疲労負荷、クリープ疲労負荷、熱疲労負荷により生じる組織変化について、負荷レベル、負荷波形、繰返し数、ならびに負荷後の後熱処理の影響を検討した。その結果、高温疲労環境下においては、保持を持たせたクリープ疲労負荷の場合は負荷中に組織変化が生じるのに対して、保持を持たない疲労負荷の場合は負荷中に顕著な組織変化は生じないこと、また、後者の場合でも負荷後に後熱処理を加えることにより前者の場合と同様の組織変化が生じることを明らかにした。

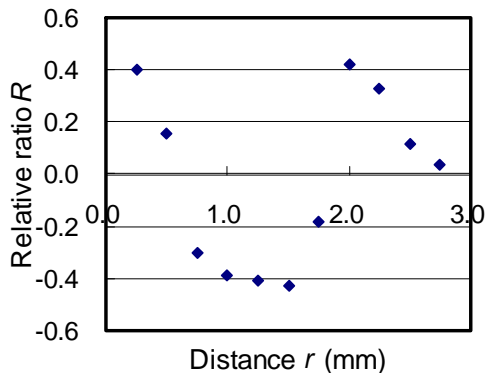
以上の実験から得られた組織形態変化に対し、その方向とタイプならびに変化の度合いを数的に定量表示することを目的として、インターセプト法ならびに Cluster-Method を開発した。インターセプト法は従来の結晶粒度測定に用いられてきた手法を独自に改良したものであり、Cluster-Method はフラクタルの考え方を基に、本研究にて独自に開発したものである。前者の手法により、組織の一方向粗大化における方向と程度、後者の手法により二方向あるいはランダムな方向への粗大化の程度を定量表示することが可能となった。

インターセプト法ならびに Cluster-Method により数的表示が可能となった組織形態変化について、その駆動力を定量評価することを目的として、有限要素法を用いた弾粘塑性解析を行った。その結果、塑性ひずみとその後の熱処理によって生じる組織変化は、低温域では残留応力場の影響を強く受け、

塑性ひずみの影響はほとんど受けないこと、一方、高温にて塑性ひずみを加えた場合は、塑性ひずみと残留応力ともに組織変化に影響を及ぼし、温度が高いほど塑性ひずみの影響が大きくなることを明らかにした(図1参照)。また、マイクロメカニクスに基づき、各力学条件下での材料系ポテンシャルエネルギーを解析した結果、超合金組織の形態変化は、 $\gamma$ 母相/ $\gamma'$ 析出相間の格子ミスフィットや各相の降伏応力の温度依存性、ならびに、それらが引き起こす界面ミスフィット緩和挙動の温度依存性に強く支配されたものであることが明らかになった。以上の解析結果を基に、組織形態と力学的負荷条件を関連付けた「組織形態変化-力学条件」マップを作成した。



(a) 残留応力と塑性ひずみの分布



(b) インターセプト法による組織定量評価値

図1 塑性予ひずみと後熱処理により生じる組織形態変化の駆動力を検討した結果の一例。インターセプト法により定量評価した組織形態の傾向 (b) は塑性ひずみの分布ではなく残留応力の方向と大きさに強く依存している((a))。

以上、本研究により得られた一連の結果は、目標としたタービン動翼の「稼働力学場検出技術」、ならびに、「動翼の寿命延伸技術」の確立に不可欠な基礎的事象を明らかにしたものである。超合金組織の形態変化に対して、ひずみと応力のどちらが支配的な駆動力として作用するかについては、関連分野でのここ数年の関心事であったが、広範な実験を通してこの問題の一部を解決した本研究の学術的意義は高い。今後は、当初の研究目標の達成に向け、超合金組織を意図する形態に人工的に変化させる手法を開発し、その手法が高温静的強度やクリープ強度、疲労強度に与える影響を検討しながら超合金部材の寿命延伸を図る。

## 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6件)

1) M.Sakaguchi, A.Sano, T.H.Tra, M.Okazaki, M.Sekihara “Low Cycle and Thermo-Mechanical Fatigue of Friction-Welded IN718/MarM247 Dissimilar Joint”, J. Solid Mech. & Mater. Eng., Vol.2, (2008), pp.1508-1516, 査読有

2) M.Okazaki, M.Sakaguchi, T.H.Tra, M.Sekihara, “Creep-Fatigue and Thermo-Mechanical Fatigue of Friction-Welded IN718 / MarM247 Dissimilar Joint”, Superalloys 2008, (2008), pp.221-228, 査読有

3) M.Sakaguchi, M.Okazaki, “A New Analytical Method of  $\gamma/\gamma'$  Morphology in Single Crystal Ni-Base Superalloys: For New Orientation of Damage and Remaining Life Assessment”, Superalloys 2008, (2008), pp.873-880, 査読有

4) M.Okazaki, M.Sakaguchi, “Thermo-mechanical fatigue failure of a single crystal Ni-base superalloy”, Int. J. Fatigue, Vol.30, (2008), pp.318-323, 査読有

5) M.Sakaguchi, M.Okazaki, “Effect of Microstructure of Thermo-Mechanical and Isothermal Low cycle Fatigue Failures of a Single Crystal Ni-Base Superalloy”, Key Eng. Materials, Vol.353, (2007), 491-494, 査読有

6) M.Sakaguchi, M.Okazaki, “Fatigue Life Evaluation of a Single Crystal Ni-base Superalloy, Accompanying with Change of Microstructural Morphology”, Int.J.Fatigue, Vol.29, (2007), pp.1959-1965, 査読有

〔学会発表〕(計 10 件)

- 1) 阪口基己, “単調負荷により生じる超合金組織の形態変化とその温度依存性”, 日本材料学会第46回高温強度シンポジウム, 2008年12月5日, 北海道登別市
- 2) 佐佐木洋輔, “実機使用ガスタービン翼の局所き裂進展特性評価”, 第52回日本学術会議材料工学連合講演会, 2008年10月22日, 京都府京都市
- 3) M.Sakaguchi, “Early Growth of Creep-Fatigue Small Crack in Advanced Ni-Base Superalloys”, 5<sup>th</sup> International Conference on Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interarion”, 2008年9月26日, Kalpallam, India
- 4) M.Sakaguchi, “A New Analytical Method of  $\gamma/\gamma'$  Morphology in Single Crystal Ni-Base Superalloys: For New Orientation of Damage and Remaining Life Assessment”, Superalloys 2008, 2008年9月16日, Champion, USA
- 5) M.Sakaguchi, “ $\gamma/\gamma'$  Morphological Changes in Single Crystal Ni-Base Superlloys under Cyclic Loadings; A New Morphological Analysis for Fatigue Damage Detection”, 6<sup>th</sup> International Conference on Low Cycle Fatigue, 2008年9月16日, Berlin, Germany
- 6) M.Okazaki, “Strength of MarM247 / IN718 Dissimilar Metals Joint under Creep-Fatigue and Thermo-Mechanical Fatigue Loading”, 6<sup>th</sup> International Conference on Low Cycle Fatigue, 2008年9月15日, Berlin, Germany
- 7) M.Sakaguchi, “Low Cycke Fatigue and Thermo-Mechanical Fatigue of Friction Welded Dissimilar Superalloys Joint”, 2008 M&M International Symposium for Young Researchers, 2008年3月9日, 和歌山県西牟婁郡
- 8) 阪口基己, “種々の負荷により生じる超合金組織の形態変化と高温力学場の検出技術への応用”, 第51回日本学術会議材料工学連合講演会, 2007年11月29日, 京都府京都市
- 9) M.Sakaguchi, “Hybrid Composite Model for High-Temperature Fatigue Life Prediction in Single Crystal Ni-Based Superalloy”, 6th Japan-China Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials”, 2007年8月22日, 宮城県仙台市
- 10) 阪口基己, “Cluster-Method を用いた単

結晶 Ni 基超合金の微細組織形態に対する定量評価”, 日本材料学会第 56 期学術講演会, 2007年5月20日, 愛知県名古屋市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪口 基己  
長岡技術科学大学・工学部・助教  
研究者番号: 60452083

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者