

平成21年 4月 1日現在

研究種目：基盤研究（C）	
研究期間：2006—2008年度	
課題番号：19560706	
研究課題名（和文）	単結晶ニッケル基超合金動翼の折損における結晶異方性と酸化層との複合作用
研究課題名（英文）	Combined effect of crystallographic anisotropy and oxidation layer on failure of single-crystal Ni base superalloy turbine blade
研究代表者	
寛 幸次 (KAKEHI KOJI)	
首都大学東京・理工学研究科・准教授	
研究者番号：70185726	

研究成果の概要：航空機タービン翼の折損事故が相次いでいる。主要因として酸化と関係するき裂進展による破壊が原因として考えられている。そこで、その抑止策を検討するために、酸化層(耐酸化アルミナイジング層と自然に形成される酸化膜)と結晶異方性(弾性異方性と塑性異方性)の複合作用による破損メカニズムについて調べた。その結果、コーティングを施したNi基単結晶超合金の破断寿命は、試験片の側面方位の影響を受けることが明らかになった。すなわち、面方位{110}材の方が面方位{100}材に比べ短くなった。これは、試験片の有効断面積の減少率および、TCP相、ポイド、{111}すべり面の配置に関係したクリープき裂の生成・進展挙動の違いによるためであると考えられる。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	290,000	870,000	3770,000
20年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3600,000	1080,000	4680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 構造・機能材料

キーワード：高温材料, 耐熱材料, タービン翼

## 1. 研究開始当初の背景

航空機タービン翼の折損事故が相次いでいる。そこで、全日空整備本部技術部の幹部技術者に原因について問い合わせたところ、「酸化と関係するき裂が要因として考えられます」という回答を得た。この回答とこれまでの研究成果から、酸化層(耐酸化アルミナイジング層と自然に形成される酸化膜)と結晶異方性(弾性異方性と塑性異方性)の複合作用による破損メカニズムと、その抑止策の着

想に至った。

## 2. 研究の目的

航空機ジェットエンジンや発電用ガスタービンのタービン翼には、耐酸化コーティングと遮熱コーティングを組み合わせた、遮熱コーティングシステムが施される。しかし、Reを多く含む単結晶超合金にアルミナイズを施した場合、コーティングにより通常生成さ

れる Ni と Al の相互拡散層 (IDZ: Inter-Diffusion Zone) の下に, SRZ (Secondary Reaction Zone) が生成されることが報告されている (図 1). ここで, SRZ や IDZ は多結晶粒組織からなり非常に脆弱なため, 荷重を負担できないことから有効断面積の減少により実効応力が上昇し, 応力破断寿命が低下すると考えられている. そして試験片厚さが薄いほど有効断面積の減少率が大きくなるため, 寿命低下率も大きくなる. また SRZ の生成は温度, 時間, コーティング前の表面の残留応力 (表面処理), 合金組成に依存すると報告されている. 単結晶超合金に Al 拡散浸透処理により耐酸化コーティングを施した場合, SRZ や TCP (Topologically Close-Packed) 相の析出が結晶二次方位 {110} に選択的に発生することが報告されている. しかしながら結晶二次方位を考慮し, 耐酸化コーティングを行うことによるクリープ特性への影響について調べた研究はほとんど行われていない. そこで本研究では, {110} 面及び {100} 面を平行部側面に持つアルミナイズを施した試験片を作製し, 900 °C/392 MPa にて <001> 方向のクリープ試験を行い, クリープ特性に及ぼす結晶二次方位の影響について調べた.

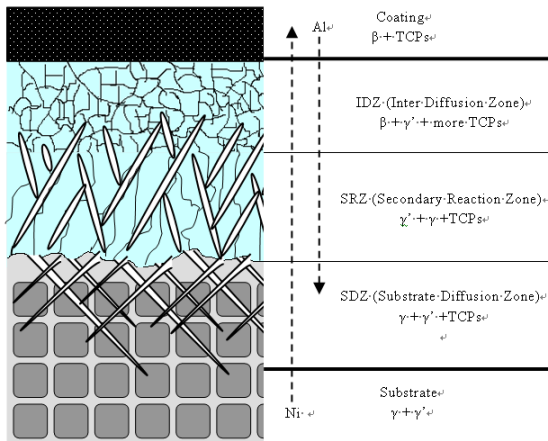


図 1 コーティングによる表面変質層

### 3. 研究の方法.

第 1 世代単結晶 Ni 基超合金 PWA1480, 第 2 世代合金 CMSX-4, 第 3 世代合金 TMS-75, NKH-304, および Ru を含む第 4 世代単結晶 Ni 基超合金 NKH-510 を供試材とした (表 1). クリープ試験片は, 標準的な熱処理を施した単結晶丸棒から背面 X 線ラウエ法により方位解析を行い, {110}, {100} を平行部側面に持つ試験片を放電加工機により切り出し 1000 °C/5 h の Al 拡散浸透処理によりコーティングを施した. その後, 二次析出  $\gamma'$  を析出させるため再度 2 段階目の時効熱処理に相当する熱処理履歴を与えた. クリープ破断試験を, 試験温度 900 °C, 負荷応力 392 MPa, 負荷方位 <001> にて行った. 負荷荷重はコーティング前の試験片断面積から算出した. クリープ試験前後のコーティング組織には, 走査型電子顕微鏡の反射電子像による観察および EBSD (Electron Back-Scatter Diffraction) 法による結晶方位解析を行った.

### 4. 研究成果

4 世代の超合金において, {110} 面及び {100} 面を平行部側面に持つ試験片を用い 900 °C /392 MPa で <001> 方向のクリープ試験を行った. 試験結果を総括して表 2 に示す. また, 試験結果の要点を下記に示す.

#### 4.1 3 世代(PWA1480, CMSX4 および TMS75)合金

- 1) TMS-75 のコーティング材のクリープ強度に及ぼす結晶二次方位の影響は, PWA1480 および CMSX-4 よりも大きい.
- 2) 表面変質層形成による有効断面積の減少率は小さく, クリープ破断寿命低下の主たる原因とはならない.
- 3) TMS-75 コーティング材において, カーケンドール効果によりボイドが形成され, 部分的に連結していた.
- 4) クリープ破断試験片の応力負荷部と無負荷部の組織を観察し比較を行った結果, SRZ

表 1 供試材の化学組成(mass%)

Alloy	Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Ta	Re	Hf	Ru	Ni
PWA1480	5.0	10.0	-	4.0	5.0	1.5	12.0	-	-	-	bal.
CMSX-4	9.0	6.5	0.6	6.0	5.6	1.0	6.5	3.0	0.1	-	bal.
TMS-75	12.0	3.0	2.0	6.0	6.0	-	6.0	5.0	0.1	-	bal.
NKH-304	11.0	6.0	-	6.0	5.4	1.4	6.8	4.8	0.1	-	bal.
NKH-510	11.0	6.0	-	6.0	5.4	1.4	6.8	4.8	0.1	3.0	bal.

は観察されなかった。

表 2 試験結果

Specimen		Creep lifetime (h) and change			Microstructures in coated specimen					
					Diffusion Zone		TCPs in substrate		Voids in IDZ	
		{100}	→	{110}	{100}	{110}	{100}	{110}	{100}	{110}
PWA1480	Coated	76	-10%	67	19 μm	21 μm	none	none	none	none
	↑	-17%	X	-30%						
	Bare	92		96						
CMSX-4	Coated	260	-7%	242	21 μm	24 μm	lot	lot	none	none
	↑	-26%	X	-29%						
	Bare	350		340						
TMS-75	Coated	525	-18%	428	30 μm	37 μm	very few	very few	lot	lot
	↑	-25%	X	-42%						
	Bare	697		732						
NKH-304	Coated	311	-19%	253	28 μm	33 μm	few	few	very few	very few
	↑	-58%	X	-66%						
	Bare	749		749						
NKH-510	Coated	641	-16%	539	28 μm	38 μm	lot	lot	moderate	few
	↑	-24%	X	-37%						
	Bare	849		849						

5) コーティングを施した Ni 単結晶超合金の破断寿命は、{110}材の方が{100}材に比べ短くなった。これは、試験片の有効断面積の減少率および、TCP 相、ボイド、{111}すべり面の配置に関係したクリープき裂の生成・進展挙動の違いによる。

#### 4.2 Ru の影響 (NKH-304 と NKH-510 の比較)

1) Ru を添加した NKH-510 のコーティング材のクリープ破断寿命の低下率は、Ru を含まない NKH-304 に比べ小さかったため、Ru の添加はコーティング材のクリープ破断寿命の向上においても非常に有効であった。

2) カーケンドール効果、残留応力の緩和、相変態による体積収縮、引け巢の吸収などの複合的なメカニズムにより IDZ 中にボイドが発生した。

3) Ru を添加した NKH-510 には、基材中に TCP 相が多数析出し、{110}材ではボイドが観察された

4) 基材の化学組成、コーティング前の表面処理とそれによる残留応力、コーティングプロセスとその化学組成、曝露温度などさまざまなパラメータのわずかな違いが、SRZ の生成に大きな影響を及ぼした。

以上の結果から、{100}面がタービン翼の表面になるようなタービン翼の設計と Ru の添加を推奨する。

#### 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 11 件)

1. The effect of Ruthenium on creep strength of Ni-base single crystal superalloys at 750 °C and 750 MPa, N. Tsuno, K. Kakehi, C.M.F. Rae and R. Hashizume, Metallurgical and Materials Transactions A, 40A, FEBRUARY (2009), pp. 269-272
2. 簡便なデータベース作成法を用いた構造用鋼の熱処理シミュレーション, 渡邊哲史, 箕幸次, 竹野裕之, 吉田功, 深尾勇人, 原口裕, 鉄と鋼, Vol. 95 (2009) 2 月, pp.22-28
3. Tension/compression Asymmetry of Creep Strength of Ni-Based Single Crystal Superalloys, N. Tsuno, S. Shimabayashi, K. Kakehi, C.M.F. Rae and R.C. Reed, Superalloys 2008, (2008), pp.433-441
4. 耐熱チタン合金 DAT54 の強度特性に及ぼす高温酸化の影響, 箕幸次, 橋本隆史, 日本金属学会誌, 第 72 巻, 第 10 号(2008) pp.819-824
5. 耐摩耗鋼板の機械的特性とマイクロ組織に及ぼす軟化熱処理の影響, 原田智也, 箕幸次, 竹野裕之, 吉田功, 鉄と鋼, Vol.94 (2008), p. 130
6. 耐酸化コーティングを施した単結晶 Ni 基超合金のクリープ特性に及ぼす結晶二次方位の影響, 上原慎矢, 箕幸次, 村上秀之, 日本学術振興会第 123 委員会研究報告, 49

(2008), pp. 45-50

7. 単結晶 Ni 基超合金のクリープ強度に及ぼす Ru の影響, 津野展康, 島林俊介, 笥幸次, Catherine Rae, 橋詰良吉, 日本学術振興会第 123 委員会研究報告, 49 (2008), pp. 51-55

8. Tension/compression Asymmetry of Creep Strength of Ni-Based Single Crystal Superalloys, N.Tsuno and K.Kakehi, International Gas Turbine Congress 2007 Tokyo, (2007)TS-091

9. 耐酸化コーティングを施した単結晶 Ni 基超合金のクリープ特性に及ぼす結晶二次方位の影響, 上原慎矢, 笥幸次, 村上秀之, 日本学術振興会第 123 委員会研究報告, 49 (2008), pp. 45-50

10. 単結晶 Ni 基超合金のクリープ強度に及ぼす Ru の影響, 津野展康, 島林俊介, 笥幸次, Catherine Rae, 橋詰良吉, 日本学術振興会第 123 委員会研究報告, 49 (2008), pp. 51-55

11. 耐熱合金の熱物性測定検討報告書, (財)資源探査用観測システム・宇宙環境利用研究開発機構 発行, 日比谷孟俊, 福山博之, 渡辺匡人, 塚田隆夫, 笥幸次, 小澤俊平, 桑原啓一, 2008 年 3 月

[学会発表] (計 11 件)

1. 単結晶 Ni 基超合金クリープ強度に及ぼす Ru 添加の影響, 島林俊介, 笥幸次, 日本鉄鋼協会「耐熱鋼および耐熱合金の組織安定性と寿命推定」フォーラム, 2008 年 5 月

2. 単結晶 Ni 基超合金のクリープ強度に及ぼす Ru 添加の影響, 島林俊介, 笥幸次, 日本金属学会 先進材料の高温強度と組織研究会, 2008 年 8 月

3. {111}<112>すべり系に対する分解せん断応力一定で行った単結晶 Ni 基超合金のクリープ, 浅利康基, 笥幸次, 日本金属学会 先進材料の高温強度と組織研究会, 2008 年 8 月

4. タービンディスク材 U720Li の疲労強度に及ぼす組織の影響, 林啓介, 笥幸次, 日本金属学会 先進材料の高温強度と組織研究会, 2008 年 8 月

5. 中温域における超合金の強度に及ぼす結晶異方性の影響 (基調講演), 笥幸次, 日本金属学会春期講演大会, 2009 年 3 月

6. 単結晶 Ni 基超合金クリープ強度に及ぼす Ru 添加の影響, 島林俊介, 笥幸次, 日本金属学会春期講演大会, 2009 年 3 月

7. {111} <112> すべり系に対する分解せん断応力一定で行った単結晶 Ni 基超合金のクリープ, 浅利康基, 笥幸次, 日本金属学会 2009 年春期講演大会, 2009 年 3 月

8. 耐酸化コーティングを施した単結晶 Ni 基超合金のクリープ特性に及ぼす結晶二次方位の影響, 上原慎矢, 笥幸次, 村上秀之, 2008 年春季大会日本金属学会講演大会, 2008 年 3

月

9. 構造用鋼における熱処理後の機械的特性推定法の開発, 渡邊哲史・笥幸次, トビ・竹野裕之・吉田功, 日本鉄鋼協会第 155 回春季講演大会, 2008 年 3 月

10. 耐酸化コーティングを施した単結晶 Ni 基超合金のクリープ特性に及ぼす結晶二次方位の影響, 上原慎矢, 笥幸次, 村上秀之, 第 45 回高温強度シンポジウム前刷集, 2007 年 12 月, p. 43

11. 航空機エンジン用耐熱合金の高温強度, 笥幸次, 第 133 回超塑性研究会, 2007 年 11 月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

笥 幸次 (KAKEHI KOJI)

首都大学東京・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 70185726

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

玉置英樹 (TAMAKI HIDEKI)

ケンブリッジ大学 C.M.F Rae

日立製作所 電力グループ 日立事業所