

# コジェネ発電用ガスタービンにおける第2段動翼の寿命評価の研究

A Study for Assessing the Life of Second Stage Blades in Gas Turbine of Co-Generation System



田中 智大<sup>①</sup>  
Tomohiro Tanaka



友野 裕<sup>①</sup>  
Yutaka Tomono



西村 太作<sup>②</sup>  
Taisaku Nishimura

## あ ら ま し

第2段動翼は空冷されていないために、燃焼温度の影響を敏感に受ける。本研究では運転時間に伴うマイクロ組織中のガンマプライム( $\gamma'$ )相の形状変化を観察することによって第2段動翼の寿命を評価してきた。第2段動翼の交換寿命はクリープ破断した試料のマイクロ組織より、 $\gamma'$ 相

のアスペクト比が3の時点とした。一方、動翼の温度は温度上昇に伴い時間の1/2乗に比例して成長する金属間化合物層の厚さから推定した。本研究の結果、第2段動翼の交換寿命はメタル温度上昇に伴い、対数的に減少する傾向があることがわかった。

## Abstract

Second stage turbine blades are not cooled by air and therefore are sensitive to combustion temperatures. In this study, the lives of second stage blades have been assessed by observing the transformation of Gamma prime ( $\gamma'$ ) phase in the microstructures with operating time. We determined that the second stage blades have to be exchanged when an aspect ratio of  $\gamma'$  phase is 3, judging from the microstructure of the creep-ruptured sample. On the other hand, we estimated the temperatures of the blades from the thickness of the intermetallic compound zone which grew in proportion to the square root of the time with the increasing temperature. As a result of this study, it is understood that the exchanging lives of the second stage blades tend to have a logarithmic decrease with an increase in the metal temperatures.

## 1. 緒 言

ガスタービンにおいて動翼は1,300 Kを超える高温ガス中で高速回転しており、温度および強度的に非常に厳しい条件下に曝されている。そのため、動翼部材には耐熱強度に優れた高価なNi基耐熱合金が用いられているが、使用寿命に限界があることから交換時期の判断が重要である。

当社では、熱電可変型コージェネレーションシステム(VHP6: Variable Heat and Power 6 MW)における蒸気噴射型ガスタービンの信頼性向上のため、メンテナンスにおいて正確に動翼の交換寿命を評価する

手法の開発に取り組んでいる。前報<sup>(1)</sup>では、実機の第1段動翼(空冷翼)において経年に伴う基材組織中のガンマプライム( $\gamma'$ )相の形状変化やコーティング層の性状変化により寿命評価が可能であるとの知見を得た。

本報では、無冷却のためメタル温度がガスタービン運転時の燃焼ガス温度の変化に敏感な第2段動翼に着目し、交換寿命とメタル温度との関係を明らかにした結果を報告する。第2段動翼の寿命評価は第1段動翼<sup>(1),(2)</sup>と同様に $\gamma'$ 相の形状変化に基づいて行い、動翼のメタル温度はコーティング層下部に生成される金属間化合物層の厚さ変化より推定した。

① Hitz日立造船株式会社 技術本部 技術研究所

② Hitz日立造船株式会社 機械・エンジニアリング事業本部

## 2. 実験方法

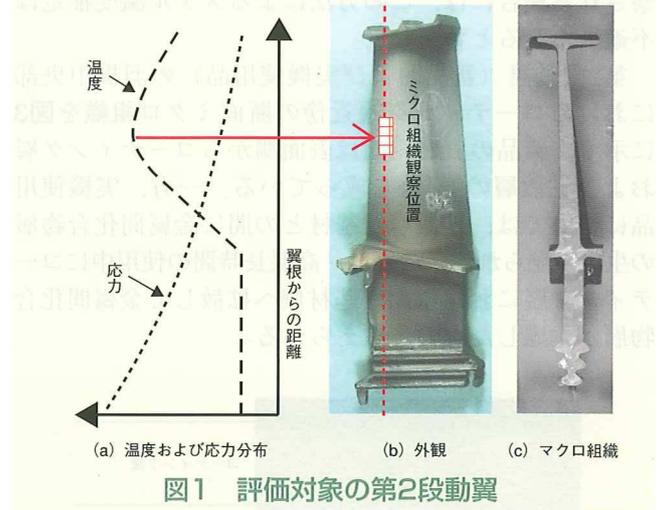
第2段動翼の基材はNi基耐熱合金MAR-M247の普通鑄造材であり、動翼表面にはAl拡散コーティングが施工されている。基材の化学分析結果の一例を表1に示す。第2段動翼の温度と応力分布の模式図、外観および断面マクロ組織を図1に示す。寿命評価とメタル温度推定のための断面マイクロ組織観察位置は最も損傷が生ずる可能性が高い位置として図1の羽根中央部縦断面とした。寿命評価のための $\gamma'$ 相の観察は、10%塩酸アルコールで電解エッチングした後、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, 以後SEMと略す)を用いて行った。一方、メタル温度推定のためのコーティング層下部における金属間化合物層の観察は、10%クロム酸水溶液で電解エッチングした後、光学顕微鏡にて行った。

表1 基材の化学分析結果の一例 (wt%)

C	Cr	Ni	Co	Mo	W	Ti	Al	B	Zr	Hf	Ta
0.15	8.3	残り	9.9	0.7	10.2	1.1	5.4	0.017	0.05	1.5	3.0

## 3. 動翼の寿命評価

第2段動翼の羽根中央部における基材の断面マイクロ組織変化を図2に示す。新品(①)では、 $\gamma'$ 相は立方体状になっているが、寿命初期において凝集粗大化(②)、寿命中期では応力方向に対して垂直方向(写真横方向)に伸びて板状の組織(③および④)になっているのがわかる。しかし、交換が必要な寿命末期(⑤)になると板状の組織が崩れている。 $\gamma'$ 相が板状に変化する現象はラフティングと言われ、高温でクリープ負荷(遠心力による一定応力)を受けた際に発生する。



この $\gamma'$ 相の組織変化は、第1段動翼と同様の経年変化挙動でありアスペクト比(長辺の長さ/短辺の長さ)で整理すると図2中のグラフに示すように運転温度の異なるガスタービン毎に運転時間に伴うアスペクト比変化曲線、すなわち寿命評価曲線を作成することができる。第2段動翼の交換寿命は、クリープ破断した動翼における基材( $\gamma'$ 相)の断面マイクロ組織観察結果より、アスペクト比3になった時点とした。

## 4. 動翼のメタル温度推定

動翼のメタル温度を正確に推定する方法としてコーティング層下部における金属間化合物層の厚さ変化を利用する手法に着目した。従来法の一つに、 $\gamma'$ 相の粒径(粗大化)よりメタル温度を推定する方法<sup>(3)</sup>が知られているが、図2のように明瞭なラフティングが観

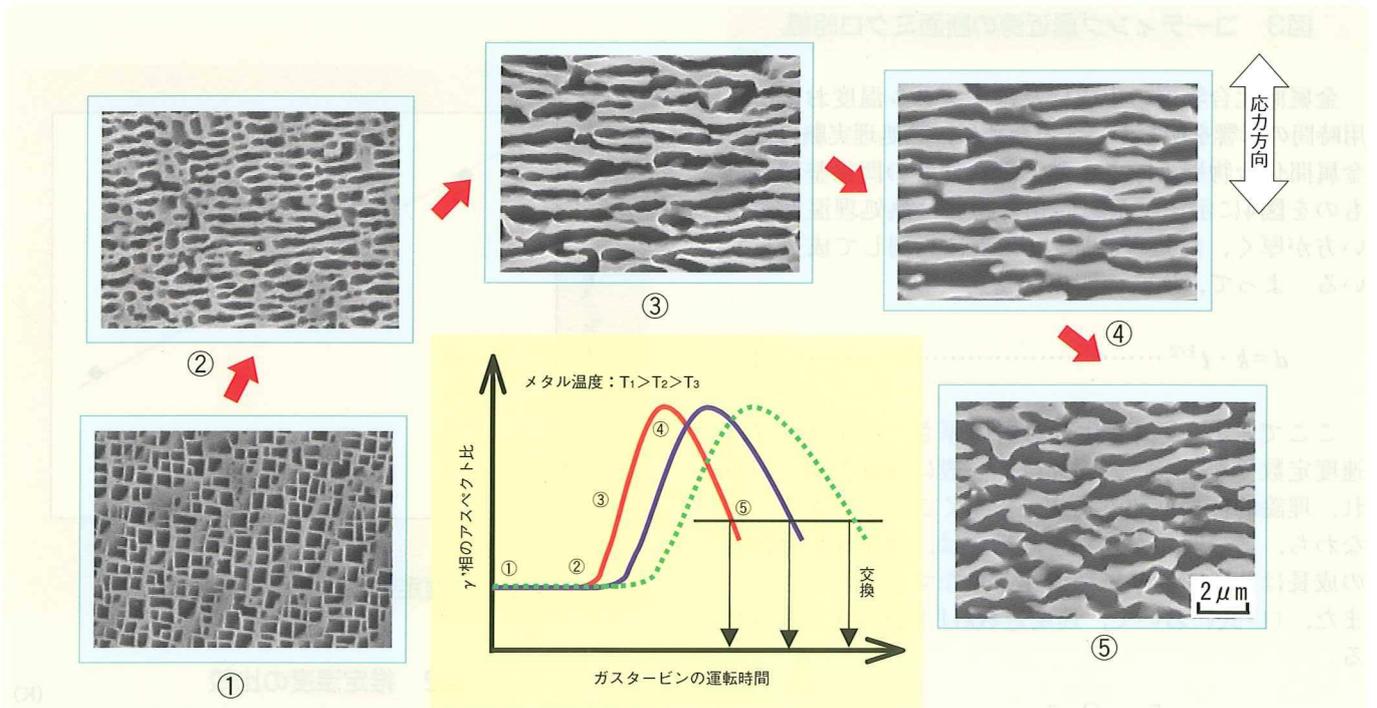


図2 第2段動翼の断面マイクロ組織変化

察される場合には、この方法によるメタル温度推定は不適當であると判断した。

第2段動翼（新品および実機使用品）の羽根中央部におけるコーティング層近傍の断面マイクロ組織を図3に示す。新品の表層組織は表面側からコーティング層および拡散層の2層から成っている。一方、実機使用品については、拡散層と基材との間に金属間化合物層の生成が見られる。これは、高温長時間の使用中にコーティング層におけるAlが基材側へ拡散して金属間化合物層が生成したものと考えられる。

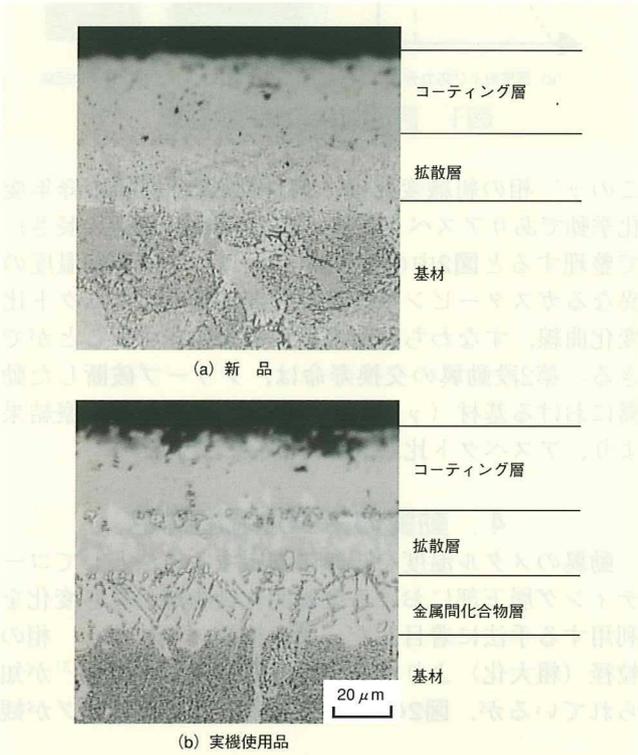


図3 コーティング層近傍の断面マイクロ組織

金属間化合物層の生成に及ぼすメタル温度および使用時間の影響を明らかにするために、熱処理実験にて、金属間化合物層の厚さと熱処理条件との関係整理したものを図4に示す。金属間化合物層は熱処理温度が高い方が厚く、熱処理時間の1/2乗に比例して成長している。よって、次式の関係が成立する。

$$d = k \cdot t^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d$ は金属間化合物層の厚さ、 $t$ は時間、 $k$ は速度定数である。この関係は、一般に放物線則といわれ、理論的にも拡散方程式から導くことができる。すなわち、この関係が成立する場合は、金属間化合物層の成長は前述の通り拡散律速と見なすことができる。また、(1)式において、速度定数 $k$ は下記の式で表される。

$$k = k_0 \exp \left[ -\frac{Q}{RT} \right] \dots\dots\dots (2)$$

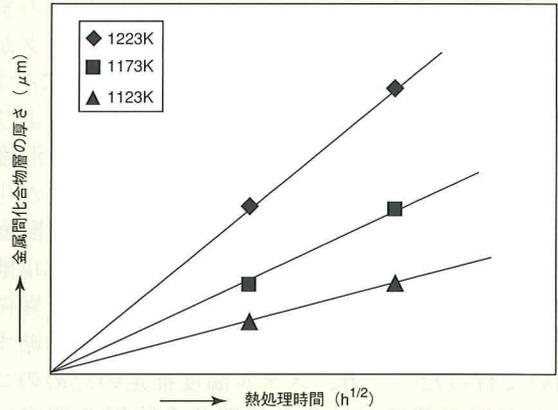


図4 金属化合物層の厚さと熱処理条件との関係

ここで、 $k_0$ は材料定数、 $Q$ は化合物層成長の活性化エネルギー、 $R$ はガス定数、 $T$ は絶対温度である。熱処理実験において、速度定数 $k$ と絶対温度 $T$ との関係を調査した結果を図5に示す。 $\log(k^2)$ と $1/T$ とは直線関係になることから(2)式が成立しており、材料定数 $k_0$ および化合物層成長の活性化エネルギー $Q$ を求めることができる。また図5より求めた $Q$ は262 kJ/molであり、NiにおけるAlの拡散活性化エネルギー268 kJ/mol<sup>(4)</sup>とほぼ同様の結果であった。以上の結果より、破断した第2段動翼について金属間化合物層の厚さ( $d$ )および使用時間( $t$ )から動翼のメタル温度( $T$ )を推定し、クリープ実験データ(羽根中央部の遠心力と同応力でのクリープ破断)から推定される温度と比較した結果を表2に示す。両者はほぼ一致しており、本方法によりメタル温度推定が可能であることを確認した。

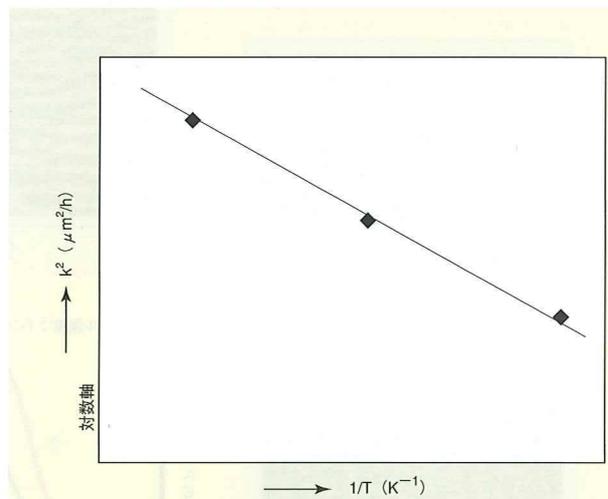


図5 速度定数と熱処理温度との関係

表2 推定温度の比較

金属間化合物層の厚さからの推定温度	1,166
クリープデータからの推定温度	1,173

(K)

## 5. 動翼のメタル温度と交換寿命との関係

実機使用された第2段動翼の交換寿命とメタル温度との関係を図6にまとめる。横軸はコーティングにおける金属間化合物層厚さより推定したメタル温度であり、縦軸は $\gamma'$ 相のアスペクト比変化(図2参照)より推定した交換寿命である。図6のプロットには連続運転やDSS(Daily Start and Stop)運転など種々の運転形態のプラントが含まれているが、推定メタル温度と対数で示す交換寿命には直線的な相関性が認められる。一般に、動翼の寿命に対する損傷因子としては、クリープ、酸化、高温腐食および疲労が知られている。本調査動翼は、燃焼ガス温度が1,200 K以下であり、燃料も天然ガスもしくは灯油であるため、酸化および高温腐食の損傷因子は無視できるものと判断される。また、本動翼は産業用大型ガスタービンのものより薄肉構造のため、熱疲労の影響は少ないと考えられる。よって、本調査材の寿命に対する損傷因子としては、クリープが支配的であると考えられる。運転形態に関係なく図6の相関性が得られたことから、今後、プラントの運転状態からメタル温度を推定する技術を導入することで、遠隔監視による動翼寿命評価(Condition Based Maintenance)の中核技術が容易に行えるものと期待される。

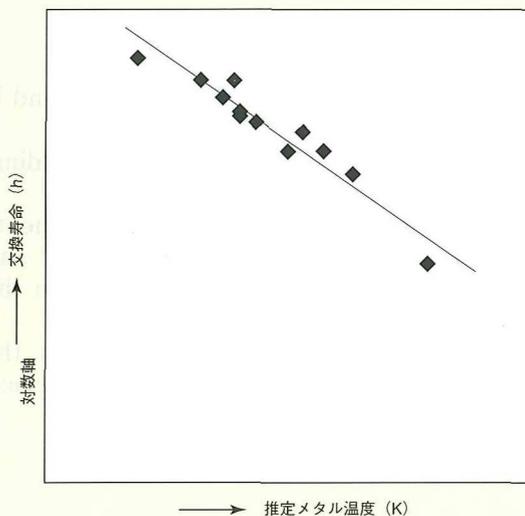


図6 交換寿命とメタル温度との関係

## 6. 結 言

コジェネ発電用ガスタービンにおける第2段動翼の交換寿命とメタル温度との関係を明らかにした。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 第2段動翼の羽根中央部における $\gamma'$ 相の運転時間経過に伴う形状変化より寿命評価曲線が得られた。
- (2) メタル温度は、コーティング下部における金属間化合物層の厚さ変化より推定することが可能であ

る。

- (3) 本研究で得られた第2段動翼の交換寿命(対数)はメタル温度と直線的な相関性が認められ、本機種での第2段動翼の寿命に及ぼす損傷因子としてはクリープが支配的であると推察される。

## 参考文献

- (1) 友野裕ほか：1,100℃級ガスタービン第1段動翼の実用的な寿命評価法の研究，日立造船技報，2002，63(1)，6-9。
- (2) 友野裕ほか：1,100℃級ガスタービン第1段動翼(Ni基耐熱合金)における $\gamma'$ 相の経時変化，日本材料学会学術講演会講演論文集，2002，51，419-420。
- (3) 吉岡洋明ほか：組織変化に基づくガスタービン動翼の運転温度推定法の検討，材料，1996，45(6)，699-704。
- (4) 金属データブック，日本金属学会編，丸善，1993，23。

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 技術本部 技術研究所  
要素技術センター 基盤技術研究室  
田中 智大  
Tel: 06-6551-9312 Fax: 06-6551-9841  
e-mail: t\_tanaka@hitachizosen.co.jp