

# ガスタービンの寿命診断技術

Life Assessment Technologies for Gas Turbines

近藤 卓久  
KONDO Takuhisa

吉岡 洋明  
YOSHIOKA Yomei

藤山 一成  
FUJIYAMA Kazunari

ガスタービンは使用条件が厳しいことから損傷を受けやすく、プラントの信頼性を確保するうえで、高温部品の損傷評価がきわめて重要な技術となっている。当社は、実機高温部品の多くの劣化・損傷状況を綿密に調査・分析して、劣化損傷を予測できる寿命診断技術開発に努めてきた。その成果として、材料の組織状況から部品劣化と余寿命を把握する技術、あるいは解析的にき裂の進展やコーティングの劣化進展を予測するシミュレーション技術、摩耗・変形・き裂などの進展を予測する統計的傾向解析技術などが開発された。これらの技術は、ガスタービンの寿命診断だけにとどまらず、部品の長寿命化に対しても大きな影響を与えた。

Since gas turbines are generally operated under high-temperature conditions, life assessment to identify damaged hot gas parts is a key technology for maintaining plant reliability.

Toshiba has developed life assessment technologies for gas turbines which can be applied to estimate the remaining life of parts. Such technologies are principally based on three methods: metallurgical evaluation, numerical simulation of degradation, and statistical analysis of damage trends. These technologies have had a significant effect on the development of parts life extension technologies.

This paper presents some of the gas turbine life assessment technologies developed by Toshiba.

## 1 まえがき

近年わが国では、効率の高いコンバインドサイクル発電設備の設置が急速に増加している。その中核をなすガスタービンは、1,000℃を超える高温の燃焼ガスを作動流体として用いることから、材料強度上から見ても非常に過酷な環境下で使用されている。このため、ガスタービンの定期検査(以下、定検と略記)における高温部品の損傷状態に応じた補修あるいは材料劣化の回復処理を実施し、部品を設計寿命近くまで使用する運用管理が採られる。

当社は、経済的に最適な保守計画を提供するために、高温部品の非破壊検査からその余寿命評価が得られるガスタービン寿命診断技術の整備を進めている。

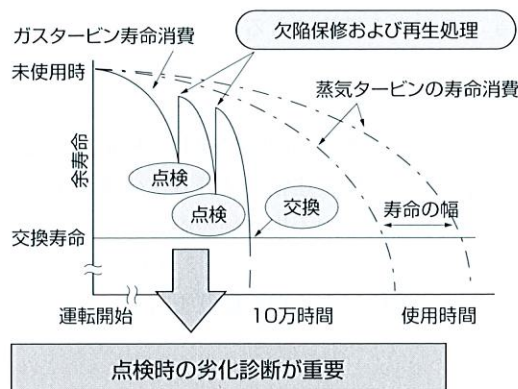


図1. ガスタービン部品の寿命消費形態 従来汽力との劣化傾向の違いを示す。

Typical life consumption patterns of gas turbine hot parts

## 2 ガスタービン寿命診断技術

### 2.1 高温部品の損傷と診断技術

ガスタービン高温部品の損傷は、従来汽力と比較しても図1のような顕著な違いが認められる。一般的に汽力は長時間使用にもかかわらず部品の損傷劣化は穏やかに進行する。それに対し、ガスタービンでは、燃焼ゾーンに近い燃焼器や第1段ガスタービン静翼などに認められる劣化は、管理時間ごとに溶接補修および材料劣化回復処理を必要とする内容で、経済的な保守計画を立てるには、その損傷劣化を精度良く評価できる技術が必要となる。

しかし、ガスタービンのように、部品寿命が短く、かつその最終寿命を精度良く予測することが要求され、一方で、優れた材料が開発されるたびに材料が変更される状況では、普遍的に適用可能な診断技術を開発することは困難である。このため、当社では誤差が大きくなる複数の手法を複合的に利用することを避け、劣化損傷形態を分類して各要因で寿命を定義する単一手法診断技術の開発を進めてきた。この手法は、定検ごとの損傷実績と予測値との照合から予測法の補正が可能で、手法の精度向上が図れる。また、部品の損傷メカニズムが変わらない限り、材料変更と



表 1. 1,100℃ 級ガスタービン高温部品の損傷形態例  
Typical damage occurring in gas turbine hot parts

部品名	材料劣化	き裂	摩耗	酸化	腐食	浸食	クリープ/変形	異物損傷
燃焼器ライナ	△	○	○	△	—	—	△	—
トランジションピース	○	△	○	△	—	—	○	—
静翼	初段	○	○	—	○	—	○	△
	2/3段	△	○	—	—	—	○	—
動翼	初段	○	○	—	○	—	○	△
	2/3段	○	△	—	—	—	○	△

実機での損傷頻度 ○…大 △…小 —…まれ

なっても若干の基礎試験だけで対応が可能な特長をもっている。

表 1 は 1,100℃ 級ガスタービンの高温部品に認められる主要な損傷要因と部品寿命へ与えるその影響度を示している。当社の寿命診断技術は、これら影響度の高い損傷要因を対象に開発を進めてきた。

### 2.2 寿命診断技術

当社が開発した寿命診断技術は、次の三つの技術に大きく分類される。

- (1) 材料組織変化から劣化状況を評価する技術
  - (2) 部品損傷の傾向解析から劣化進展を予測する技術
  - (3) 損傷の数学モデルから劣化進展を予測する技術
- 以下に、これら各技術についてその内容を述べる。

**2.2.1 材料劣化診断技術** 材料劣化診断技術は、材料組織の時効変化を定量的に評価し、その材料の強度、クリープ破断時間に変換して劣化診断する手法である。ガスタービン高温部品に使用される Ni 基超合金の組織中に見られる析出強化相  $\gamma'$  [ $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ] は、使用温度、作用応力、時効時間によって図 2 に示すような緻(ち)密な立方状から粗い大きな球状組織へと変化する特徴をもつ。この特

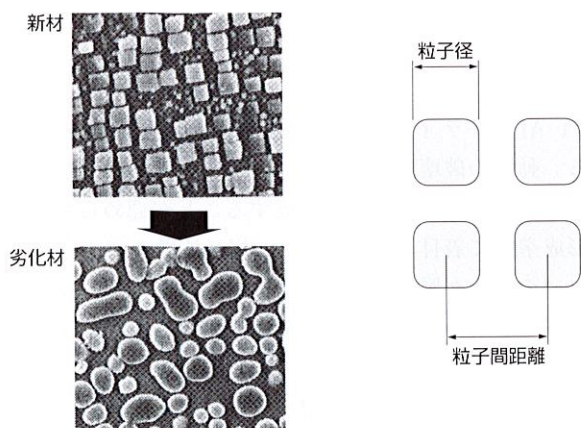


図 2. 動翼材 IN738LC の時効劣化と  $\gamma'$  相 劣化すると  $\gamma'$  相は変化する。  
Gamma prim coarsening on IN738LC bucket material

性に着目して、当社は人工劣化材での実験室的研究から粒子径と粒子間距離を劣化評価パラメータとする材料データベースを構築した。そして、実機劣化材との比較によって劣化状況を評価できる技術としてまとめている。

図 3 は  $\gamma'$  相の時効時間に対する温度と粒子径変化との相関関係を表した事例を示している。材料はガスタービン動翼材 IN738LC である。初期組織の粒子径が成長していくようすを数式化して、劣化評価したい翼組織の粒子径と時効時間から部品の使用温度を把握する手法を確立している。そして、実機翼の組織観察から使用温度推定を試みたところ、図 4 のように解析結果と良い一致を示し十分適用可能なことを確認している。

また、この研究によって、組織中の  $\gamma'$  相変化と材料の硬さや引張強さのような特性との相関関係も明らかとなり、数式化に成功している。

このように組織を定量的に評価して材料特性と結び付ける評価式を開発したことにより、設計基準に沿った評価が

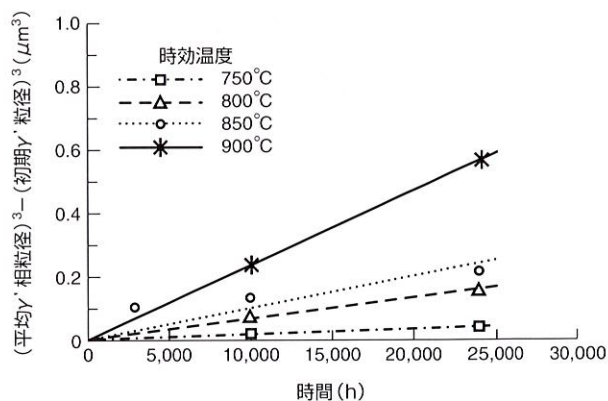


図 3. 動翼材 IN738LC の  $\gamma'$  相成長挙動  $\gamma'$  相は時効温度に依存して成長する。  
Behavior of gamma prim coarsening

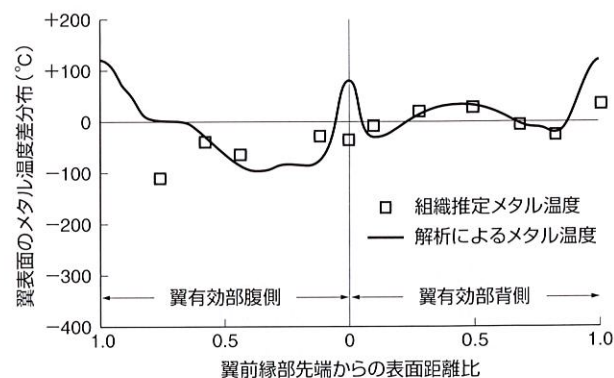


図 4. 翼表面のメタル温度推定 金属組織から使用温度の推定ができる。  
Estimation of metal temperature based on metallurgical analysis



可能となった。

**2.2.2 部品損傷診断技術** 部品に生じたき裂、変形、摩耗といった外的損傷が今後どのように進展するか予想できれば、計画的な保守計画へつなげることができる。部品損傷診断技術は、このような外的損傷変化傾向を傾向解析して予測する技術である。

図5はガスタービン初段静翼のある部位に発生するき裂を傾向解析した事例である。き裂発生後の成長をガスタービン起動回数によって整理すると、あるばらつきの範囲でマスターカーブを引くことができる。これにより、き裂の成長速度から修理時期の計画が可能となる。

同一の運転条件であれば傾向解析データから損傷の進展を予測できるため、この診断技術を用いて定検時の検査項目の削減、補修間隔の見直し、補修基準の緩和などの検討が可能となる。

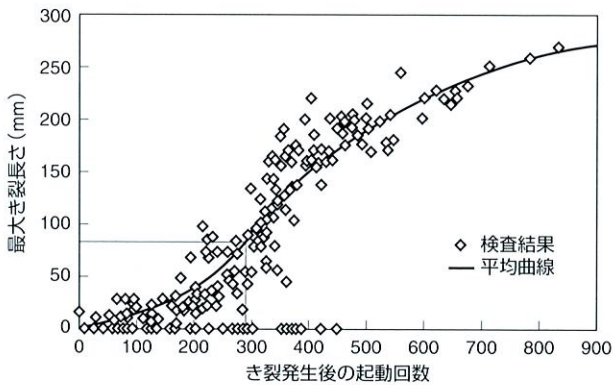


図5. 初段静翼におけるき裂の傾向解析例 き裂発生後の進展は部位ごとに特徴がある。

Typical crack propagation trend analysis

**2.2.3 シミュレーション解析技術** コーティングした部品の劣化状況を把握するには、部品を切断調査するか、コーティング層を除去してその下にある組織を観察する以外困難である。また、部品のき裂進展は運転モードが変わった際にそれによって損傷挙動が変わり、これまでの進展傾向から外れる場合がある。

シミュレーション解析技術は、このような破壊調査をさげ、解析的に劣化進展を予測する技術である。

図6はガスタービン動翼表面に施行されたコーティングの劣化と動翼基材の劣化進展状況を表わしている。コーティングは、動翼の高温酸化・腐食を防ぐために施行しているが、寿命消費は速い。動翼基材の劣化はコーティング劣化とともに同時に進行する。しかし、コーティングの保護機能がなくなれば、基材の寿命は急速に消費される。そのため、通常、再コーティングして動翼の延命化を図る。

図7は、シミュレーション解析技術を動翼表面に施され

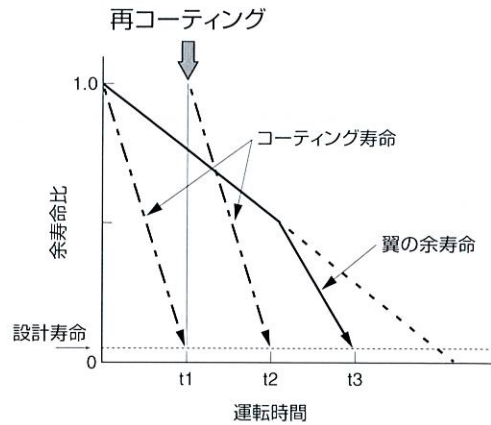


図6. コーティングと動翼基材の劣化形態 コーティング劣化によって動翼基材劣化は加速する。

Degradation of bucket material with coating

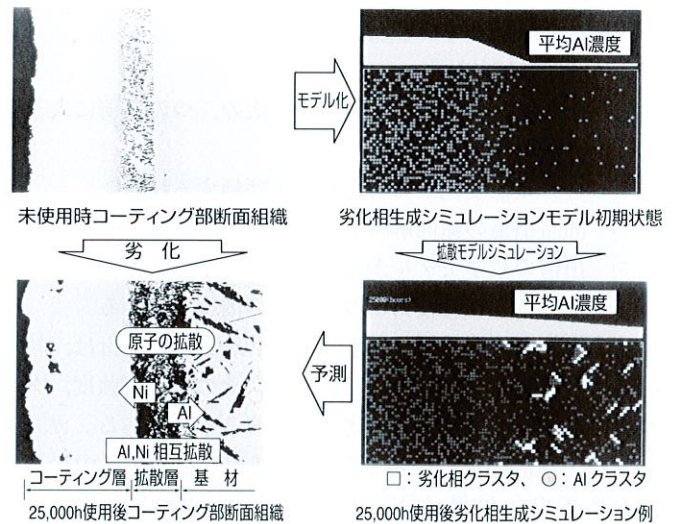


図7. コーティング劣化の予測シミュレーション解析技術 拡散モデルにより劣化組織生成時期を予測できる。

Degradation and damage prediction technology for coating based on simulation analysis

た Pt-Al コーティングの寿命診断に適用した例を示している。動翼の破壊調査から、コーティングの劣化が進行すると基材に針状の劣化相が形成することが認められる。この形成挙動に着目し、AlとNiの相互拡散モデルを作成してコーティング層の劣化予測シミュレーションソフトウェアを開発している。実際の現象は原子レベルでの挙動となるが、解析時間を効率化するために微少なクラスタモデルを仮定し、その拡散運動を解いている。この技術は、実機で生じる複雑な劣化挙動を解析して再コーティング時期を評価するのに有効である。

シミュレーション技術適用事例のもう一つに、ガスタービン静翼のき裂進展がある。運転モードを変更する場合、



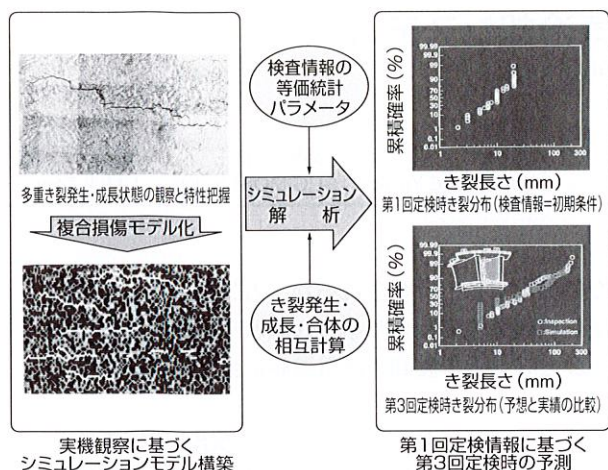


図8. き裂進展の予測シミュレーション解析技術 複合損傷モデルによりき裂進展を予測できる。

Degradation and damage prediction technology for crack propagation based on simulation analysis

静翼のき裂進展の変化挙動が問題となる。微細き裂が進展し合体して大きなき裂に成長していく過程は、複雑である。その複雑な理由が静翼の金属組織に強く依存することを突き止め、実組織に近い組織の数学モデルを開発した。図8は近似した組織をベースにき裂が合体しながら進展する挙動をシミュレーションした事例である。シミュレーションでは、き裂発生分布を定検時のデータに合せてから予測解析している。結果は実機の発生・進展分布と良い一致が認められている。

### 3 寿命診断技術とガスタービン保守

当社が開発した寿命診断技術は、1,100℃級ガスタービン高温部品の損傷に対し、表2のように適用し活用している。具体的には、寿命の延長、修理判定基準の見直し、修理時期の推奨に活用し実績をあげている。

さらに、高温部品の長寿命化技術開発にも、診断技術を

表2. ガスタービン高温部品の損傷と寿命診断技術

List of life assessment technologies

対象部品	損傷内容	寿命評価手法
燃焼器	強度劣化	組織評価法
	き裂・摩耗	傾向解析
	変形	組織評価法
静翼	き裂	傾向解析 シミュレーション解析
	クリープ変形	傾向解析
動翼	強度劣化	組織評価法
	コーティング劣化	シミュレーション解析

応用している。恒常的に発生する損傷は、設計時に予測できない知見によって生じていることが多い。診断技術は、そのような損傷を理論的に評価する技術であるから、長寿命化技術開発には威力を発揮する例もある。燃焼器の例で見ると、き裂と摩耗が定検間隔を制約する大きな要因であるが、どの部位にどのような改善を施すべきかを傾向解析を用いて解明している。動翼の長寿命化の例では、組織評価技術やコーティング劣化シミュレーション技術を劣化状況および回復把握の手段として活用している。

長寿命化技術の部品への適用は、当社と米国GE社の合弁で1996年に設立したガスタービン部品の補修専門工場である東芝・ジーイー・タービンサービス(株) (以下、TGTSと略記)にて施工する。TGTSはGE社の最新の補修技術だけでなく、当社が開発した補修技術のいずれも利用できる特長をもつ。

### 4 あとがき

コンバインドサイクルは起動特性が良いことから、今後ミドル負荷火力としての位置付けがますます強くなり、頻繁な起動停止を要求されることになることと予想される。そのような過酷な運転に対して、ガスタービン高温部品はこれまで以上に精度の高い寿命診断と延命化施策が必要となる。当社は寿命診断のいっそうの技術向上と部品の長寿命化に向けた技術開発を推進していく所存である。

### 文献

- (1) 岡部永年, 他. ガスタービンの寿命診断・保守技術. 東芝レビュー, **49**, 4, 1994, p.275-278.
- (2) 吉岡洋明, 他. ガスタービン高温部品の寿命診断技術. 日本ガスタービン学会誌, **24**, 93, 1996, p.48-52.



近藤 卓久 KONDO Takuhisa

電力システム社 火力事業部 火力改良保全技術部部长。  
コンバインドサイクル機器の改良保全業務に従事。日本ガスタービン学会、火力原子力発電技術協会会員。  
Thermal Power Systems Div.



吉岡 洋明 YOSHIOKA Yomei, D.Eng.

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター  
金属・セラミックス材料技術担当主幹, 工博。  
エネルギー機器の材料開発および寿命診断技術開発に従事。日本ガスタービン学会, 日本鉄鋼協会, 日本材料学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



藤山 一成 FUJIYAMA Kazunari, D.Eng.

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター  
金属・セラミックス材料技術担当主査, 工博。  
火力発電機器の材料強度, 寿命診断技術開発に従事。日本機械学会, 日本ガスタービン学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center