論説◆解説

特集：ガスタービンの保守管理と信頼性向上技術

コンバインドサイクル発電におけるガスタービン設備の保守管理

藤井　　泉[*1]
FUJII Izumi

キーワード：高温部品，高効率化，コストダウン，ユーザ技術，ライフサイクルコスト，
Hot Gas Path Parts，High Efficiency，Cost Down，User's Technology，Life Cycle Cost

1．コンバインドサイクルの発展と課題

近年，コンバインドサイクル発電は国内だけではなく海外も含め火力発電設備の主力となっている。国内では1980年代にタービン入口温度が1,100℃級のガスタービンを採用したコンバインドサイクルが最初に導入されたが，更なる高効率化の追求による各種の技術革新により，現在は1,500℃級ガスタービンを採用したコンバインドサイクルが営業運転を開始するに至っている。

この様な「高効率コンバインドサイクルの開発」＝ガスタービンの高い燃焼温度に耐えられる部品，いわゆる「高温部品の開発」といっても過言ではない。ガスタービンの主要構成機器であるこの高温部品（図１，２）の高温環境下における耐久性の向上を果たすために，各メーカは高温材料の開発及び遮熱効果等を目的としたコーティング技術や翼冷却技術の開発を進めてきた。

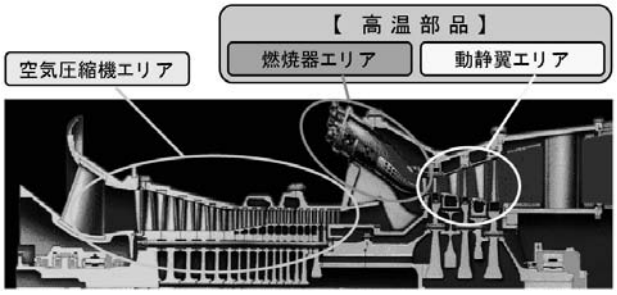


図１　ガスタービンの構成

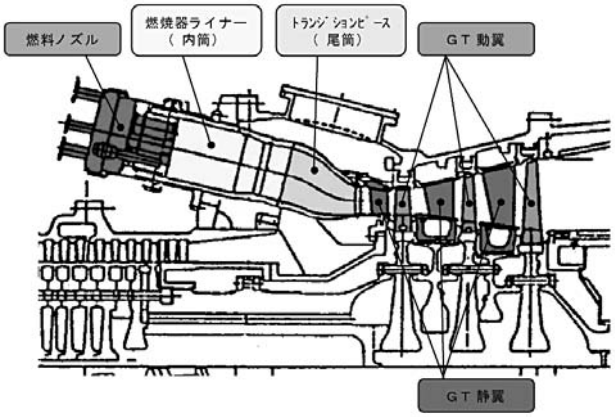


図２　高温部品の構成

表１　当社におけるコンバインドサイクルプラント

	系列	軸数	軸出力 MW	系列出力 MW	熱効率 %(LHV)	初軸運開年	GT型式
CC	富津1,2	14	165	2,000	47	1985	9E型（GE）
ACC	横浜7,8	8	350	2,800	54	1996	9FA型（GE）
	千葉1	4	360	1,440	54	1999	M701F型（MHI）
	千葉2	4	360	1,440	54	1999	9FA型（GE）
	富津3	4	380	1,520	55	2001	9FA+e型（GE）
	品川1	3	380	1,140	55	2001	9FA+e型（GE）
MACC	川崎1	3	500	1,500	59	2007	M701G2型（MHI）
	富津4	3	507	1,520	59	2008	9H型（GE）

その結果，当社では1985年に富津１，２号の1,100℃級コンバインドサイクル設備運転開始に続き，1996年からは1,300℃級，そして2007年には1,500℃級のコンバインドサイクル発電の導入に至ったが（表１），これはわずか20年の間にガスタービンの性能が大きな進歩を遂げた証でもある。

この様にガスタービンの高効率化によって燃料費の削減やCO_2排出の削減などを達成することができたが，その一方メンテナンスという観点から見れば「保守費用の増大」という大きな問題を抱えるようになった。ガスタービン燃焼温度の上昇に伴い，材料に求められる高温強度も当然上がるため，そのまま部品価格の上昇につながる。また寿命途中で必要となる修理においても，コーティング等の新技術に対応した新しい修理技術も必要になることから，修理のコストも従来より上昇することが避けられない。更に設計上の寿命も短く設定されることに加え，修理不可の損傷による廃却率も上がる可能性が高く，各高温部品のライフサイクルコストは従来に比べて上昇傾向にある。

本稿ではこれらの諸課題に対する当社の試みや，その他一般的に行われている各種方策について紹介したい。

2．メンテナンスコスト低減に向けた試み

ガスタービンの主要構成部品である高温部品のメンテ

原稿受付　2008年11月13日
＊1　東京電力株式会社　火力部
火力エンジニアリングセンター　設備技術G
〒100-8560　千代田区内幸町１－１－３

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

ナンスコストを抑えることが，コンバインドサイクル全体のメンテナンスコスト低減につながる。よって高温部品のメンテナンス費用の達成が大きなポイントとなるが，これは「定期的な修理での費用低減」と「寿命取替時期の延伸」が２つの大きな柱となる。

2.1　定期的な修理での費用低減

各メーカは各高温部品に対して，修理点検のインターバル，点検箇所とそれに対する修理要否判定基準を設定しており，ユーザは基本的にはそれに従って各高温部品毎にメンテナンス計画を策定したり，修理内容を決定することになる。

ただしメーカが設定する修理インターバルや修理要否の判定基準は，各ユーザ毎に個別に設定されているのではなく，基本的には同じ型式のガスタービンに対して一律に設定されている。今や世界中でガスタービンが使用されているが，ガスタービンが設置されている環境やユーザによる使用条件，運用条件も様々である。例えば使用する燃料についても油とガスの違いがある。また同じガスでも産地によってカロリーや成分も異なったり，同じ産地でも液化されて低温のLNGとして使用されることもある。これらの様々な条件の違いが結果として燃焼器の燃焼状態にも影響を与え，異なった損傷が発生する場合がある。またガスタービンの運用方法も様々で，定格出力による連続運転のケースと，ピーク対応用として毎日起動停止を繰り返すケースでは高温部品を始め，多くの金属材料に与える影響も大きく異なり，実際の損傷として表面化するパターンも異なってくる。

メーカ側もある程度はこういったガスタービンの使用方法の違いに対応したメンテナンスの基準を設定しているが，様々な条件に対してきめの細かい対応ができているとは言えず，また開発して間もない機種については使用実績データも十分に蓄積されていないことから，これらの基準は最大公約数的なより安全サイド側の保守的な数値に設定されることが多い。またこの基準値は実際に使用された高温部品を詳細に評価した結果を基に設定された数値ではなく，あくまでも設計上の解析をベースとした数値が設定されていることが多く，根拠が明確に提示されていない場合がほとんどである。

よってメーカが設定した修理要否基準をそのまま適用した場合，かなり安全サイドな，言い換えれば必要以上の過剰な修理となってしまうケースが多くなる。勿論，使用開始当初はユーザとしてもどの高温部品のどの部分がどのように損傷して，どのような修理が必要かという知見が無いため，ある程度の期間はメーカ推奨通りの修理を行わざるを得ないし，特に新しい型式のガスタービンを採用した場合は，高温部品においてもメーカが想定していなかった初期の不具合を生じることが多々あり，予定外に代替部品を用意する必要に迫られるなど，ユーザとしても運用面の対応に追われてしまい，「修理費用低減」という課題まで手が回らないのが実情である。

しかしこういったメーカーが想定していなかった設計に起因するような初期の不具合に対する対応においても全てメーカ任せにはせず，地道にメーカと技術的な議論を継続的に行うことによって各高温部品に対する知識が蓄積される。また，ガスタービンの運用実績に基づくユーザならではの技術を身に付けることができる。

更に高温部品の検査技術についても，ユーザの工夫次第では修理費用低減につなげることができる。当社では動翼の非破壊検査技術について独自の手法を開発し，実際の検査で活用する試みを行っている。これによってメーカでは修理不可と判断された動翼を救えることができる。

つまり不具合の発生はユーザにとって大きなダメージには違いないが，逆に高温部品のメンテナンスを含む総合的な知識を得る大きなチャンスにもなり，それによって修理費用低減方策の開拓にもつながる。こういったことで得られる一つ一つのユーザ技術がガスタービンの世界ではまだメーカと対等に議論できるだけの十分な効力を有していると考える。メーカ側はあくまでも設計をベースとした考え方に頼らざるを得ないところがあるが，まだ発展途上と言われているガスタービンメンテナンスの世界では，極端に言えば「実際に使ってナンボ。実績が全て。」というケースが非常に多いからである。

当社ではこういった背景から，ガスタービン設備のメンテナンスコストの大半を占める高温部品の修理費用を低減させるべく，自社独自の修理要否判定基準を制定する試みを10年位前から始めた。その修理要否判定基準は使用実績が基本となることから，最悪の不具合発生ケースを想定して動翼のような回転体からではなく，静止体である燃焼器や静翼から始めたが，その中でも様々なリスクを想定して対象部位の選定にあたった。リスク想定のベースの考え方としては，「ガスタービンという回転体に対して飛来物によるダメージ（＝FOD）を与えないようにする」というシンプルなものである。例えば燃焼器のある部分に，メーカ修理要否基準を超えた長さのクラックが確認された場合に，

- このクラックを修理せずに次回点検まで放置し，運転中に更にクラックが進展した場合，どうなるか？
- 大きな部品の欠損が発生するか？
- 欠損した部品が燃焼ガス流れに流入した場合，後流側の各部品へどういった損傷を与えるか？

といった具合にリスクを想定する。

この程度の内容であれば，高温部品の構造や構成を理解していればおおよそリスク想定が可能である。勿論，次回の点検時に当社独自の判断で修理を先送りしたクラック等の状況確認やその評価は必要である。過去の実績では，ユーザでもある程度判断できるリスクの比較的少ないレベルまでしか踏み込んでいないこともあり，独自の修理基準を適用したことによって大きな失敗をした

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

事例は無いが，こういった贅肉をそぎ落とす程度の取り組みでも，高温部品の修理費用単価が非常に高額であるという背景があるために，コスト低減効果は高く，当社のように多数の同型機を所有している場合は水平展開による大きなコストダウン効果が得られる。

またこういった作業は，点検時に当社社員直営による検査が必要となり，手間や時間も費やす地道な作業となるが，その見返りとして高温部品に対する知識も必然と身に付くため，「個人のスキルアップ→更なるコスト低減方策の発掘」という相乗効果も得られる。

2.2　寿命取替時期の延伸

各高温部品には修理基準と同様にメーカの設定した取替寿命があるが，これも設計ベースでの数値であり，各プラントによって真の寿命は異なるはずである。

その真の寿命を見極めるポイントは，簡単に言えばその部品の寿命クリチカル部位を見つけることである。それは大きく分けて以下の３パターンになると考える。

①材料そのものの寿命（このまま継続使用した場合，実機使用環境下で破壊してしまう場合）
②修理不可能な損傷による寿命（修理によって使用可能な状態に戻らない場合）
③経済性評価による寿命（修理は可能であるが，多額な費用が発生してしまい，新品に交換した方が経済的にメリットが出る場合）

同じ高温部品でも，燃焼器と動翼，静翼では材料も異なれば，損傷形態も当然異なるので，個別の評価が必要となるが，そのヒントは定期的に行う点検修理の中にあるため，前項2.1での取り組みの延長線上にあると言える。

よって当社では寿命延伸するための試みとして，上記①～③のパターンを使い分けて評価し，必要に応じて実機使用品の破壊検査を行いながら当社における真の寿命を見極める試みを行っている。各高温部品の価格は修理費以上に高額であることから，この寿命延伸によるメンテナンスコスト低減効果は更に大きく，高温部品の寿命評価については当社としても積極的に取り組んでいるところである。

2.3　その他のメンテナンスコスト低減方策

2.3.1　修理インターバルの延伸

修理のインターバルを延伸することによって，年間当たりの修理回数が減り，結果としてメンテナンスコストも下げることが可能となる。更に工場修理期間に余裕ができることから，場合によっては予備品の数量を減らすことも可能である（図３）。

この議論は前節までに取り上げた修理基準とも大きく関連している。メーカの修理基準の考え方は，「この修理基準を適用すれば，次回点検までユニットの運転に支障が出るような損傷は発生しない。」というものである。よって次回点検までの時間を先延ばしにする＝修理インターバルを延伸するためには，修理基準をより厳しく管理するか，部品自体の耐久性を向上させてより長い時間の使用を可能にするといった方法が考えられる。

前者の修理基準の厳格化についてであるが，例えば

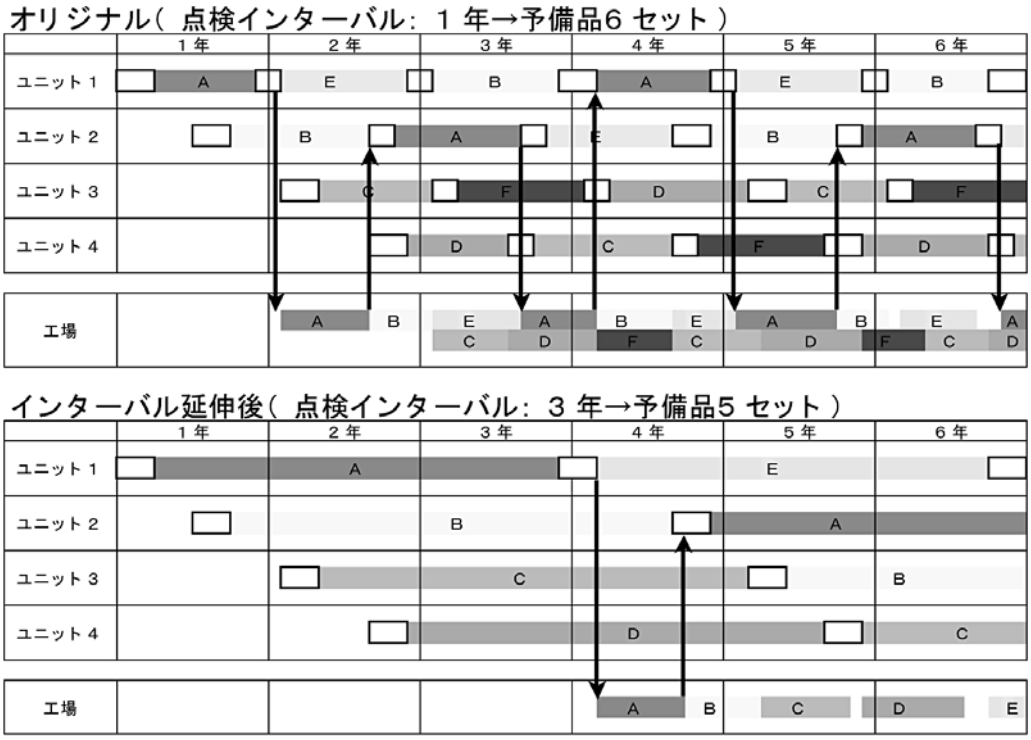


図３　インターバル延伸による効果

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

メーカ修理基準よりさらに保守的に修理をすることによってより新品に近い状態に戻して耐久性向上を図り，より長時間の運転に対応することができるかもしれないが，いくら新品に近い状態にもどしたとしても，部品の構造的，材料的耐久性が元々長時間の運転に対して厳しい場合には有効な方法にはならない。

当社での過去の経験によれば，当初設計よりも著しく短い時間で廃却となってしまうような不具合が発生したり，決められたインターバルに到達する前にユニットの安定な運転に影響を与えてしまうような不具合が発生した場合は，メーカが何らかの対策を施すことになる。その結果として部品の耐久性が当初設計上の耐力を上回るケースがある。また不具合が発生しなくても，部品の耐久性向上達成はメーカとして技術力の高さを証明する手段にもなることから，メーカは改良品の開発にも積極的に取り組んでいると思われる。

こういった耐久性向上部品を適用することによって点検修理のインターバルを延伸することが可能となる。新たな改良品を適用する場合は，既存の部品よりも価格が上昇するのが一般的であり，先行投資による投資回収時期の試算などのコスト評価が必要となる。特に既存品について当初設計寿命前に取替えを行う場合は，既存品の残存価値も投資費用に加算する必要がある。

また部品を一式取替えるのではなく，部分的に耐久性を向上させる手法もある。例えばコーティングのグレードアップや部品の付加による冷却構造強化といったものである。これらの方法は，通常の点検修理の中で適用可能なケースが多く，投資額としても部品の丸ごと取替えに比べれば影響が比較的小さい。

2.3.2　長期保守契約の活用

メーカ側もユーザのメンテナンスコスト低減のためのツールを持っている。2000年頃の新設コンバインドサイクル用ガスタービンの販売ピークを過ぎて以降，各メーカは次の売り上げ増方策としてメンテナンス部門に力を入れ始めた。その一つが「長期保守契約」であり，一般的にはLTSA（=Long Term Service Agreement）と呼ばれている。これは長期間（12年以上など）に渡って契約で約束した利用率を守るために，高温部品の修理や取替えを行ったり，運転の状態を常時監視するというものである。その契約条件はユーザとの協議である程度個別に決めることが可能となっている。

この長期保守契約は，例えば保有するユニット数が少ない場合や，メンテナンスに対するマンパワーが十分に確保できない場合，また使用実績がほとんど無い新機種を導入する場合などには有効なツールになると言われている。同型式のユニット数を多く所有する場合は，予備部品を所有することによって運用面でもリスク回避面でも効率的であるが，ユニットが少ない場合，予備部品を所有することは決して効率的とは言えない。またユニット数が少ないのにも関わらず，限られた時期だけに行うメンテナンスのために常に人員を確保するのは効率が悪い。そこにメーカも目を付けたわけである。長期保守契約におけるそれぞれのメリットは以下の通りである。

〔ユーザ側〕

- 不必要な予備部品や人員を用意する必要が無い。
- 利用率が保証されているため，発電事業としての信頼性を確保できる（利用率未達の場合はメーカにペナルティを要求できる）。
- 支払いの方法も含めて契約するため，資金調達等の計画が立てやすい。

〔メーカ側〕

- 長期間に渡ってメンテナンスを独占できる。
- 収入の見通しがある程度立てられる。
- 利用率保証が最大の使命であることから，それさえ守れれば自社の判断で高温部品の運用を自由に決められる。
- 試作品の実機使用も可能であり，自社技術の開発にも利用できる。

以上からわかるように，ユーザにとって長期保守契約は一つの「経営者のツール」といえる。デメリットとしては高温部品等のメンテナンスがメーカ任せになってしまい，技術的な面がブラックボックス化してしまうということがある。しかし経営者として技術情報はそこそこで十分と判断できれば特に問題とはならない。

実際にこの長期保守契約は，国内外の多くのIPPやPPSで採用されており，メーカとしても今後更に力を入れていくものと思われる。

2.3.3　高温部品海外修理会社の活用

通常，高温部品の修理先や取替部品の購入先はガスタービン本体製造会社である，いわゆる原メーカとなるが，これは原メーカに価格を操作される可能性が高くなるとも言える。こういう構図に目を付けたのが高温部品海外修理会社，いわゆる3rd. partyである。

3rd. partyは原メーカよりも大幅に安価な価格で修理や部品の販売を行うのが最大の売りで，最近ではインターネットでも簡単に3rd. partyを検索できるほど，多数存在しているのが実情である。

特に世界的に台数も多く，技術面でもかなり熟成してきた1,100℃級を対象とした3rd. partyは多数存在している。

ユーザ側にとっては安価な価格はとても魅力的ではあるが，それと引き替えに技術面でのリスクも高いといえる。よって実際に適用する場合には特に技術面での評価を適切に行う必要がある。

最近ではメーカ側もユーザの3rd. partyへの流出防止のための処置をとっており，前項で説明した長期保守契約もその一つといえる。長期保守契約ユーザにはより有利な条件を与えることによって未契約ユーザとの差別化をより明確にするなど，従来よりも長期保守契約を積極

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

的に展開しく傾向にある。

更に技術情報の漏洩を防止すべく，以前よりも情報管理の厳格化が進んでおり，長期保守契約を結んでいないユーザにとってはメーカとの距離が徐々に広がっていく感が否めない。

3．今後の展開

以上，コンバインドサイクルにおけるガスタービンメンテナンスコスト低減方策について紹介したが，自社修理基準の作成による「定期的な修理での費用低減」と「寿命取替時期の延伸」の取り組みについて，当社では1,300℃級ガスタービンまで展開しているが，1,500℃級については今後の課題である。

冒頭でも記載した通り，ガスタービンの高効率化により燃料費削減効果は得られるが，それに相反してメンテナンスコストは増加する傾向にある。それらをカバーするために自社独自の管理基準の策定を行ってきたが，新しい技術が多く適用されればされるほど，メンテナンスもより複雑化することは避けられず，従来通りのコストダウン効果を得ることは至難の業である。

現在では1700℃級ガスタービンの開発も行われており，昨今の地球温暖化対策としてガスタービンの更なる高効率化が要求される時代ではあるが，今後はメンテナンスも含めた「トータル的なライフサイクルコスト」も加味したガスタービンの選定，採用が肝要であると考える。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

特集：ガスタービンの保守管理と信頼性向上技術

中・小型ガスタービンコージェネレーションシステムの保守管理

三輪　昌隆[*1]　MIWA Masataka
佐竹　諒一[*2]　SATAKE Ryoichi
市川　　薫[*2]　ICHIKAWA Kaoru

1．はじめに

ガスタービンコージェネレーションシステムは，エネルギー回収効率が80％近くに達し省エネルギー性が高いこと，同時にCO_2削減効果も高く10MW以下を中心として市場への導入が順調に進んできた。東海地区を中心とした当社管内においても170MW（74台：産業用）のコージェネレーションシステムの導入が進んできたが近年の急激な燃料価格の高騰によりコージェネレーション導入の採算性が問題となり新規に建設される案件が急減した。

こうした状況において，すでに導入されているコージェネレーションシステムを安定的に運用することが最も重要なテーマとなってきている。そこで当社における保守管理の一環として進めているタービン動翼の余寿命研究，遠隔監視システムによる予防保全，コージェネ関連機器の予防保全について紹介させていただく。

2．予防保全と信頼性向上の取り組み

2.1　タービン動翼の寿命評価研究活動

東邦ガス㈱は，当社管内のお客さまに省エネルギー性や環境適合性に優れた天然ガスを選択していただくために，都市ガスの製造・輸送・供給・利用に関する分野，環境保全やコストダウンに関わる分野等で研究開発を行なっている。ガスタービンに関する研究は，ガス利用機器の材料強度や寿命を定量的に評価し，安全性の向上や安定操業の維持，コストダウンを実現することを目的とした，信頼性評価技術研究の一環として取り組んでいる。

ここでは，ガス利用機器の余寿命評価技術として取り組んでいる，スモールパンチクリープ試験によるクリープ寿命評価について紹介する。

スモールパンチクリープ（以降，「SPC」と略記する。）試験は，微小試験片材料評価技術の一つで，装置から採取した微小試験片のクリープ特性評価を目的とした試験方法である。厚さが0.5mmで，縦横10mm程度の板状の試験片の中心に荷重をかけ，その変形量からクリープ特性が求められる。従来の軸荷重によるクリープ試験に比べ，試験方法がシンプルであることから，高温機器の余寿命評価での利用が期待できる。現在，標準的な試験方法についての検討が，関係する学会で進められている。当社では，室蘭工業大学様のご指導の下で，試験方法の検討を進めている。

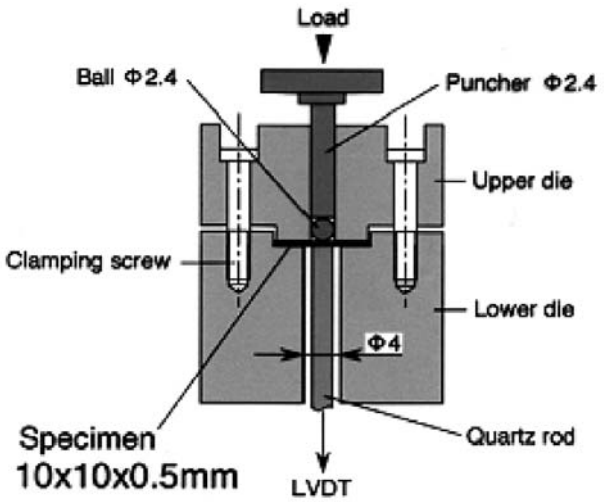


図１　ホルダー内のSPC試験片

SPC試験装置は，雰囲気置換および真空での加熱が可能な恒温槽，誘導加熱装置，パンチャー，セラミックボール，試験片ホルダー，変位計から構成されている。図１は試験片をセットした様子を示しており，試験片ホルダー内の試験片は，パンチャーに押されたセラミックボールにより変形を受ける。試験片のクリープ特性は，パンチャー荷重と試験片中央変位の時間変化の関係となる。なお，このパンチャー荷重は，適切な変換を行なうことにより，応力で表すことが可能である。

次に，SPC試験の例を示す。試験は，温度1050℃の下で，３水準の荷重で行なった。SPC試験を高温環境下で行なうと，表面酸化の影響が強くなることが知られているため，一般的には，アルゴン雰囲気や真空下で行なわれる。本試験は，10－３Pa以下の真空下で実施した。試験片は，ガスタービン動翼から採取したもので，10mm（幅）×10mm（高さ）×0.5mm（肉厚）の板状である。表面は，肉厚の許容誤差が±0.005mmとなるように研磨した。

図２に，SPC試験で得られた，時間―試験片中央変位曲線を示した。３水準の荷重のうち，最も荷重の低い条件では，試験片は破断に至っていないが，他の２水準で

原稿受付　2008年11月20日
＊１　東邦ガス株式会社　総合技術研究所
＊２　東邦ガス株式会社　ソリューションエンジニアリング部
〒456-8511　名古屋市熱田区桜田町19－18

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

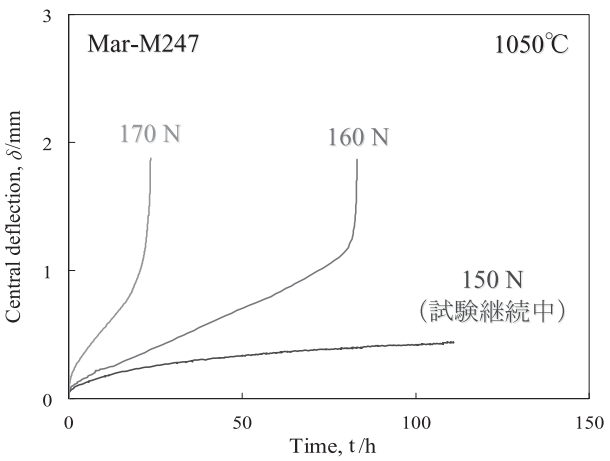


図２　時間―試験片中心変位曲線

は，破断に至った。図から明らかなように，破断に至った条件下では，クリープ曲線は，一般的なクリープ曲線と同様に，遷移クリープ，定常クリープ，加速クリープに相当する領域が見られた。

このように，SPC試験は，実機から採取が可能な微小試験片を利用して，従来のクリープ試験と同等のクリープ特性が得られる試験技術である。実働設備から採取した材料が利用できることから，余寿命評価にとって非常に有効である。今後もこうした評価技術の適用に関する研究開発を続け，ガス関連設備の信頼性向上に貢献していく。なお，本節の内容に関して，室蘭工業大学材料物性工学科駒崎准教授のご指導を頂いた。ここに記して謝意を表す。

2.2　遠隔監視システムを用いた予防保全活動

ガスコージェネレーションシステムは，その普及とともに，設置先におけるエネルギー供給設備としての重要性が高まっており，より高い信頼性が要求されている。

当社では，コージェネレーションシステム（以降，「CGS」と略記する。）における顧客ニーズ「不具合を減らす」「不具合を早く直す」「運転状態を確認する」を満足させるためにCGSの信頼性向上に向けた活動に取り組んでいる。

CGSの信頼性向上に向けた活動の取組みの一つとして，設備の異常傾向を事前に検知し，重大故障を未然に防ぐことを目的に遠隔監視システム（商標，ASSISTLINE24）を採用した。

この遠隔監視システムによる取組みは，オンライン監視による基本性能計測，予防保全，故障解析，警報通知，Webデータ閲覧およびメンテナンスの最適化など多岐にわたっている。本節では主に，遠隔監視システムの概要，CGSにおける故障の特徴，オンライン監視による活動内容の一例および活動実績について紹介し，当社のCGSにおける予防保全活動の概要について紹介する。

2.2.1　遠隔監視システム概要

当社では，その多くのCGSプラントに専用の遠隔監視端末を搭載しており，運転状態監視，データ収集，異常傾向の検知を行っている。顧客設置先の遠隔監視端末より運転状態データを一般回線を利用し，常時オンラインで監視している。その運転データは当社データベースサーバに保存し，必要に応じて閲覧することができる。

その概要図を図３に示す。また，万が一故障が発生した場合，当社センターへ自動通報され，必要に応じて当社担当者の携帯に連絡が入り，担当者が警報を確認後，不具合情報に基づき故障要因解析及び対策判断を行い早期復旧に努める仕組みとなっている。その各機能を以下に述べる。

2.2.2　監視機能

遠隔監視システムでは下記の各種データを監視している。また監視体制としては，故障発生時にパトライトを点滅させて関係者に音声によるアナウンスを流すと同時に警報を発し，故障を瞬時に通知する。

また，遠隔監視システムに取込まれているデータは以下の通りで，これらのデータを分析することで本質的な原因を究明することが可能である。

①アナログデータ：

発電量・蒸気量・ガス使用量など，現在運転中のリア

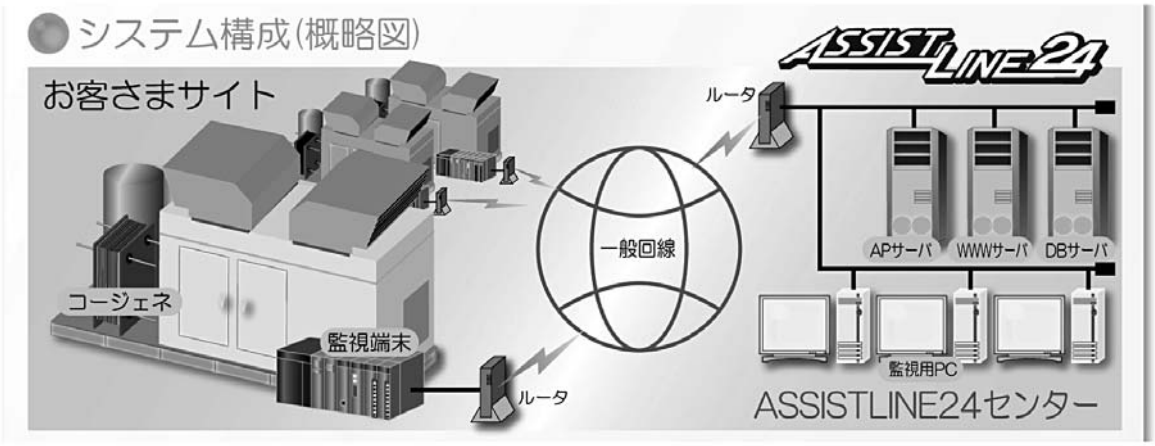


図３　遠隔監視システムの概要図

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

ルタイムデータ
②接点状態データ：
ポンプ・冷凍機などの運転・停止情報
③アナログ警報：
故障条件を設定して，故障前に警報発令
④トレンドデータ：
通常１分毎，故障時には0.1秒毎の時系列データ

2.2.3　インターネット経由表示機能

顧客に設置されたCGSの状態を当社センター及び各作業エリアで，インターネットを経由して，リアルタイムで閲覧することができる。閲覧できるデータには2.2.2の各種データ，イベントデータ，アラームリストおよび帳票（日報や月報）データなどがある。

2.2.4　予防保全支援ソフト

当社では，遠隔監視システムでCGSの異常傾向を検知し，設備の予防保全を支援するソフトウェアを自社開発した。予防保全支援ソフトの機能として代表的なものを下記に紹介する。
①自由期間選択トレンド機能：
排気温度・発電出力など，過去の一定期間の推移を分析し，各種運転状態を確認する。
②領域自動判定監視機能：
各種状態データの正常領域を設定し，領域を出たデータを自動的に検知し通知する。当機能については2.2.6で述べる。
③排気温度監視機能：
ガスエンジンの各気筒の排気温度を監視し，失火やノッキングの状況を検知して通知する。

表１　故障の分類

	徐々に進展する故障	短時間で発生する故障
異常の例	フィルター詰まり，熱交換器の汚れ，過給器の汚れ，各部からの漏れ等	ノッキング，ピストン焼付き，メタル焼付き，失火等
特徴	• 発生頻度は高い • 損傷は小さい場合が多いが，大きな故障へと発展する可能性がある	• 発生頻度は低い • エンジンやタービンに大きな損傷を与え，復旧時間が長い
対策	• 定期的な遠隔監視データの確認 • 遠隔監視データによる異常傾向解析	遠隔監視システムで収集しているデータでは時間刻みが長く，兆候を捕らえきれないため，監視端末内でのリアルタイム解析・故障診断を実行

2.2.5　コージェネの故障の特徴

CGSは原動機・排熱回収設備・運転制御方法・収集データの違いなど，機器の種類が多く，システム構成も顧客によって異なるため，汎用的な手法による異常傾向の検知は困難であった。下表１は故障の種類とその対策についてまとめたものである。

2.2.6　オンライン監視による予防保全活動

前述のような故障につながる異常傾向を事前に検知し，故障を未然に防止する予防保全活動が重要である。予防保全活動では，常時監視している運転データに，自社開発した「予防保全支援ソフト」を用いて異常傾向を検知している。「予防保全支援ソフト」は異常傾向検知のための複数の機能を有しており，各設備の特徴に合わせた異常傾向検知ロジックを用いている。その一例として領域自動判定監視機能では，任意の２項目間で設定した散布図上に任意の領域を設定することで定刻に収集したデータが領域外に出た場合に警報を出して異常を知らせる。この機能を用いた予防保全の概要を図４に示す。

2.2.7　予防保全活動の実例紹介

ここでは遠隔監視システムを用いて，CGSにおける不具合を検知し要因解析および復旧対策を行った事例を紹介する。
①不具合事例：ガスエンジンCGSのシリンダ出口排気温度の分散値のバラツキが，領域自動判定監視機能により

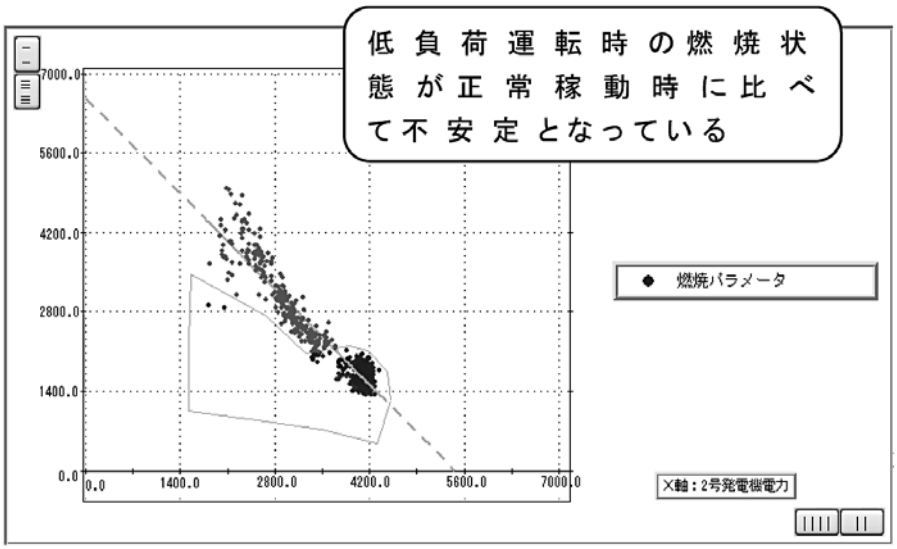


図４　領域監視機能を用いた予防保全の概要

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

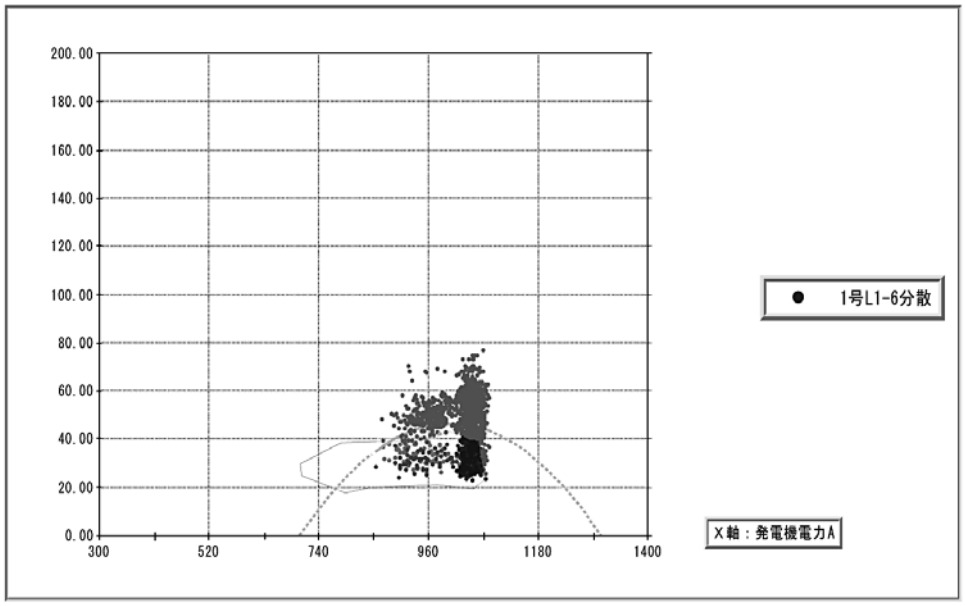


図５　シリンダ排気温度の分散値のバラツキ

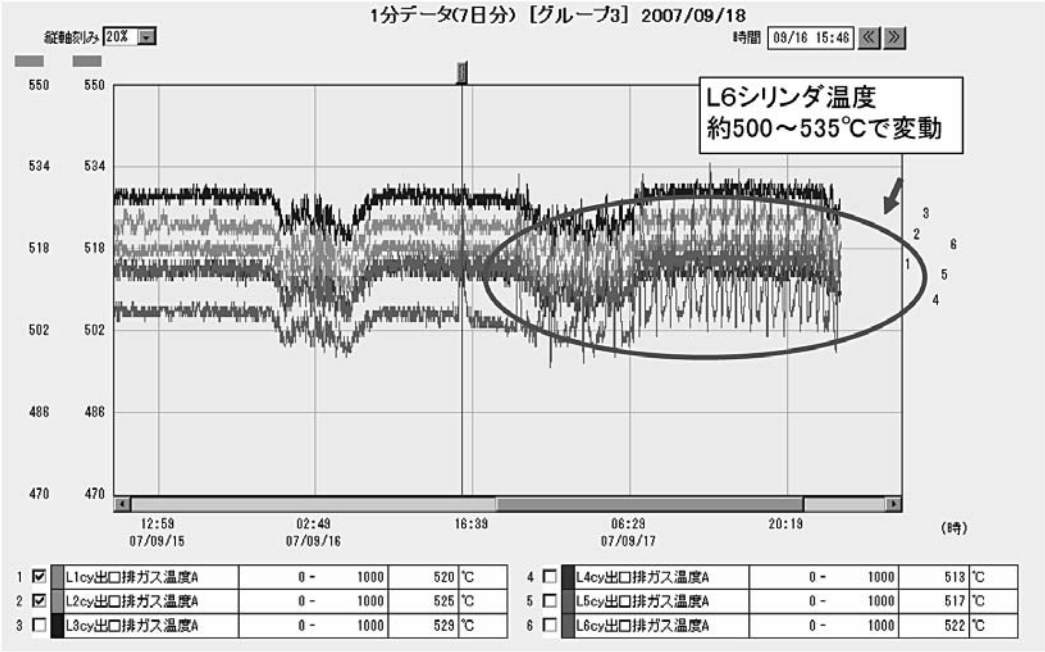


図６　シリンダ排気ガス温度変動

検知された。（図５）トレンドデータを調べると，L3シリンダ出口排気温度がハンチングし，通常時より30℃前後上昇していた。（図６）

②緊急対応：前項の異常傾向を遠隔監視システムで検知後，当社メンテナンス担当者が遠隔監視システムを用いた運転データ比較や過去の不具合事例比較などを検討し要因解析を行った。その結果，故障要因として排気弁の漏れなどが考えられるため復旧工程および応急対策についてメーカと協議の上，温度変動を抑える緊急対策としてエンジン出力を下げる調整を現地にて実施した。

③恒久対策：今回の不具合事象からCGSのガスエンジンに何らかの不具合が発生している可能性が高いものと考えられるため，客先の運用に影響の少ない深夜にシリンダヘッドの分解点検を行った。その分解点検の結果，排気弁の磨耗が著しいことが判明し，シリンダヘッドの交換を実施した。

④結果：今回の不具合は排気弁の損傷またはライナの損傷による排気の吹き抜けに起因していたことが判明した。したがって，遠隔監視システムによるデータ解析および緊急対応によりエンジンに発生していた同一混合気圧の出力低下による混合気圧力目標値と実際の混合気圧力の偏差が増大による故障停止（機関緊急停止）を回避できた。

この事例のように故障停止を回避した結果，運用上の

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

デメリットを未然に防止したことで顧客から大きな信頼を得ることが出来た。

このように当社では，遠隔監視システムを用いた予防保全活動を推進しコージェネの信頼性向上活動に取り組んでいる。現在，更なる新機能を搭載したシステムを開発し，異常傾向検知の精度を向上させ，より高い信頼性の構築を目指している。

3．コージェネ関連機器の予防保全に対する取組み

コージェネレーションシステムの老朽化に伴い，原動機として使用されているガスタービンエンジン以外の関連機器についての予防保全対策が重要な位置付けとなってくる。

ここでは発電機，排熱ボイラ，制御装置，ポンプ等の予防保全の重要な点について紹介する。

3.1　発電機の予防保全

発電機の耐用年数は一般的に15年程度といわれている。しかし，自己通風型発電機の場合など設置環境によっては，７～８年程度で発電機内部の絶縁コイル部に油煙やホコリが付着し絶縁不良をもたらし発電機内部短絡事故に至るケースがある。

こうした発電機内部短絡事故を未然に防止するためには，絶縁診断装置による定期検査を実施し，絶縁低下のデータを解析しながら絶縁劣化度合いを診断していく必要がある。この絶縁診断装置による定期診断は一般的に稼動後４～５年目から実施し，それ以降は定期的（１年または２年毎）に絶縁診断装置によりデータを蓄積し発電機の経年劣化度合いを判断する。これらの絶縁診断技術は発電機メーカに多くの経験と技術力が有るため絶縁診断装置を扱っているメーカと協議し適正な診断を実施することを推奨する。

次に発電機の不具合発生率の高い事故として軸受に関する事例が上げられる。発電機軸受けの不具合の予防保全対策としては定期的（３～５年毎）に点検することが理想で可能ならば予備軸受を準備しておくことが望ましい。

3.2　排熱ボイラの予防保全

排熱ボイラでは，伝熱管の減肉，伝熱管内部のスケール詰まり等が大きな不具合となっている。伝熱管で多く見られる減肉の主たる原因はボイラ給水のpH管理（錆缶剤）と溶存酸素の処理に問題あることが多い。

また，スケール詰まりの多くは温度の高い蒸発管部に集中してシリカが固着し，進行が進むと蒸発管の閉塞に至ることもある。これらの予防保全対策としては，ボイラ給水のpH管理（錆缶剤），溶存酸素の管理と連続ブロー量が関連しており薬品メーカと連係して薬品の選定および運転管理を実施していく必要がある。

3.3　制御装置の予防保全

制御装置の予防保全はCGSの定期整備に合わせて制御装置から機側計器の信号ケーブルのループチェックおよびキャリブレーションによって，信号回路が適正に作動しているか定期検査する方法が主流である。しかし，ループチェックが正常であっても電子回路基板の経年劣化を推測することは難しく適正な予防保全方法が確立されているとは言えない。

こうした中，現実的には電子回路基板に使用されているコンデンサーの経年劣化により寿命が支配されていることが多くコンデンサーの経年寿命から推定して不具合に至る前に回路基板ユニット一式を事前に交換し予防法保全を計画的に展開していくことが望ましい。

ただし，これら制御装置の更新には工事期間と費用が多く掛かるため予防保全に取組む側としては重要な課題となる。

3.4　ポンプ類の予防保全

従来ポンプ類については分解整備が主流であったが，分解整備に掛かる人件費，交換部品費，整備期間さらに整備後の信頼性を考慮すると必ずしも分解整備による保全方法が最善とはいえない。これらポンプ類は整備することで新品と同様な性能で再使用が可能と思われる。しかし，ポンプの種類によっては新品を購入して交換する方法が結果としてコスト低減および高信頼性につながることがあるので事前に検討しておくことが必要である。

4．終わりに

コージェネレーションシステムの予防保全においては創意と工夫によって，ユーザの期待している信頼性向上とメンテナンスコスト低減を達成することが可能と考えている。また，コージェネレーションシステムには不具合が伴うものであるが，その原因究明に当たってはコージェネレーションシステムを単なる機械として捉えるのではなく視点を機械側の立場に立って考えてみると本質的な原因が見えてくる場合が多い。

ここ数年は燃料価格の高騰によりコージェネレーションシステムの新規導入は少ないものと思われるが，先に述べたとおりエネルギー回収効率が80％に到達できるシステムは他に類がない。

こうした状況の仲，ガスタービンコージェネレーションシステムの関係する技術者の方々には厳しい環境となっているが，燃料価格が正常に戻ればコージェネレーションシステムも復活するものと信じている。

終わりに本寄稿の作成に協力していただいた関係者の方々には心より謝意を表します。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

特集：ガスタービンの保守管理と信頼性向上技術

航空エンジンのモニタリング技術動向とＩＨＩの取り組み

大熊　まなみ*1　OKUMA Manami
古川　洋之*1　FURUKAWA Hiroyuki
園　　尚弥*1　SONO Hisamitsu

キーワード：航空エンジン，モニタリング，予知診断，EHM，DOC，LLP，Prognostics，FADEC

1．はじめに

航空エンジンにおけるモニタリングでは，エンジン各部の状態を監視し故障や劣化傾向を診断（Diagnostics）することで故障の発見や修理箇所を特定するといった取り組みが従来から行われてきたが，最近では予知診断（Prognostics）の考え方に基づいた部品の寿命予測による使用時間管理・補用品手配などの整備計画最適化や予兆検知による致命的故障の回避など，運用方法・ロジスティクスおよび整備戦略の意思決定支援までを含んだEHM（Engine Health Management）の概念が主流となってきており，防衛・民間分野を問わず注目を集めている。

また，世界的規模で広がりを見せる燃料費高騰や価格競争の激化といった社会情勢を背景に，航空機業界では経済性に対する要求が一段と増している。一般に航空エンジンの経済性の評価では本体取得価格のみならず維持・運用に掛かるコストまでを考慮することが重要であるが，これは航空エンジンが安全性を維持しつつその時に得られる性能を最大限に発揮させるために運用開始後も定期的な検査・整備やLLP（Life Limited Parts）と呼ばれる寿命制限部品を始めとする部品の交換を継続的に行う必要があるという特徴を有するためである。これらを含んだ民間航空機の運用に関わるコストを示す主要な指標であるDOC（Direct Operating Cost；直接運航費）を見ると，整備費の占める割合は約17%（200-300席クラス，図１）[1]，さらにエアラインから公表されたデータによれば，同クラスの機種における整備費のうちエンジンに関わる費用は約40%を占めており[2]，エンジンの燃料消費率を直接低減する技術革新と同様に整備に関わる費用の低減が経済性改善に大きく寄与することが分かる。このような背景から，モニタリング技術により整備性を改善することがDOC低減に繋がり，さらに経済性向上へ貢献することも期待されている。

一方，飛躍的な電子技術の発展を背景に，現在では

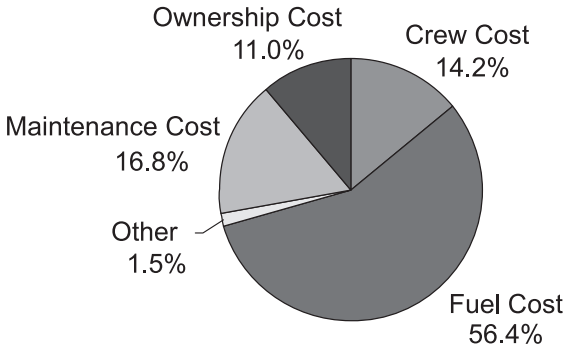


図１　民間航空機（200-300席クラス）の2007年９月までの12ヶ月における直接運行費（DOC）内訳

FADEC（Full Authority Digital Electronic Control；全デジタル式電子制御）が航空エンジンの制御方式として広く採用されている。高度な演算処理が必要なモニタリング技術は，これらソフトウェアを含めた電子技術の飛躍とともにさらなる成長の可能性を広げている。本稿では，これらの技術の動向とIHIにおける取り組み事例について紹介する。

2．モニタリングの必要性

航空エンジンにおいてモニタリングを行う目的として以下の３点が挙げられる。

・整備性改善

運用時間管理によるオーバーホールや部品寿命制限といったハード･タイム方式では安全マージンを十分に取った上で部品交換が行われるが，新たなモニタリング技術では制限時間限界まで使用することが可能となり，またオンコンディション方式では，故障部位特定の確度を増すことによりこれまで運用経験で設定されてきた検査間隔を延長することが可能になると期待される。さらにコンディション・モニタリング方式では，適切な部品交換・修理時期の設定や部品手配の最適化など，整備計画への提案も期待される。

・信頼性向上

IFSD（In Flight Shut Down；飛行中エンジン停止）やUER（Unscheduled Engine Removal；計画外エンジ

原稿受付　2008年12月５日
＊１　株式会社ＩＨＩ　航空宇宙事業本部
技術開発センター　制御技術部
〒190-1297　東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

ン取り卸し），出発時間の遅れなどの発生率を低減する。これによりミッション達成率の向上や，計画外の整備時間を減らしフリート全体でのエンジン使用時間を伸ばすことなどにより，経済性改善に繋がる。

・安全性向上

故障の兆候を監視し，飛行安全に関する重大事故を未然に防ぐことにより，さらなる安全性向上も期待される。

これらの項目はそれぞれ独立に達成されるものではなく，互いに関連している。現在は特に整備性改善に関する技術について適用事例も含めて研究開発が進められており，本稿でも主にこの部分に焦点を当てて議論を進める。

3．航空エンジンモニタリング技術の定義と分類

モニタリングとは広義には様々な目的のために対象システムの状態を監視することであるが，航空エンジン分野においては，安全性の確保や純粋なエンジン制御を目的とするものとは区別して，整備性向上のために拡張された機能や技術を指して用いられることが一般的で，本稿でもこの定義に沿う。ここではモニタリングに含まれる要素技術を運用段階における活用方法を始め，信号処理や診断アルゴリズムなどの診断手法（ソフトウェア），さらにこれらを実装するためのシステム構成（ハードウェア）に分類した上で，実施例や技術動向を示す。

3.1　活用方法

モニタリングの対象はガスパスの性能から機械部品の健全性まで多岐に渡る（図２）。またこれらの対象に対して，航空機の機上で行われるものと，地上において整備や後方支援活動として行われるものに大別される。

3.1.1　機上モニタリング（On-Board Monitoring）

飛行中にリアルタイムに状態を監視することにより，オペレータへ警告を発したり地上へ整備情報を提供したりするものである。

⑴ エクシーダンスモニタリング

オペレータによる計器表示の監視や，機上コンピュータによるパラメータの自動監視を指す。対象パラメータについて，あらかじめ設定した最大または最小の制限値を超えた場合に警告メッセージを発したり，異常発生時のトラブルシュートを行うためのデータ記録を行ったりするもので，代表的な監視パラメータにはエンジン回転数や排気温度，潤滑油量／温度／圧力，振動がある。

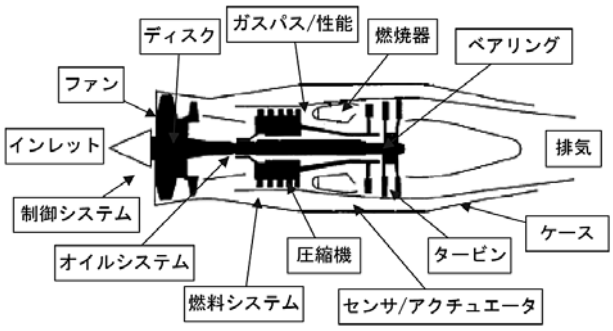


図２　モニタリングの対象例

⑵FADECシステム自己診断

FADECシステムを構成する各種センサ，アクチュエータ，電子部品などのBIT（Built In Test；組込みテスト）を行い異常検出した場合には，機体システムへ警報を送るとともにLRU（Line Replaceable Unit）/SRU（Shop Replacement Unit）などの交換可能部位が区別できる整備支援情報を提供する。

⑶ガスパス故障診断

高圧圧縮機や低圧タービンなど，エンジンガスパスの各モジュールの異常診断を行い異常検出した場合には，機体システムへ警報を送るとともに，故障の箇所やモジュール交換に必要な整備支援情報を提供する。

3.1.2　地上モニタリング（On Ground Monitoring）

地上整備時に実施される検査やデータ記録，機上および地上で収集されたデータの解析を行い，整備の効率化や整備計画支援を行うものである。

⑴定期検査

飛行時間または飛行回数など機種毎の整備手順や実績を元に決められる検査間隔に従い定期的に行われる検査で，ボアスコープ検査（内視鏡を用いたエンジン内部の目視検査），燃料系統および潤滑油系統のフィルタ点検，MCD検査（Magnetic Chip Detector；潤滑油内の磁性体検出）などがある。

⑵ユーセージデータ

ユーセージデータと呼ばれる運用情報の記録や，故障発生時に取得したデータの記録・解析を行うものであり，具体的には以下のような活用例がある。

・長期監視を行うパラメータの記録

サイクル数，クリープ部品の高温運転時間，エンジン作動時間，始動回数などから，部品の寿命・運用リミットの予測・更新（見直し）を行う。

・環境，運転条件の記録

エンジンの運用状況を正確に把握するため，飛行条件（飛行速度，飛行高度など），搭載される航空機／エンジンの識別情報，エンジン主要パラメータなどを記録する。

⑶トレンドモニタリング

飛行毎や一定時間毎に行う手動／自動でのデータ記録や，飛行中に一定条件下（例えば離陸中の最大出力）で記録されたパラメータを，基準状態に補正した上で中長期的に監視し，変化傾向から異常の前兆を捉え整備活動に繋げるものである。現在行われている主な項目を以下に示す。

・潤滑油消費量モニタ

エンジンオイルタンクの油位を計測し，飛行毎の潤滑油量の変化傾向を監視することで異常を早期に発見する。潤滑油量はエンジンの姿勢や持続加速度などの変動要因が多く，機上の計器監視でオイルシステムの故障を正確

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

に検知することが困難であるため，従来このような方法が取られてきたが，診断精度やリアルタイム性の向上を求めて新たな技術の研究開発も行われている。

• 潤滑油分光分析

潤滑油に含まれる，金属成分の分析および含有量を調べることにより，ベアリングなどのエンジン内部の部品の磨耗損傷有無と部品の特定を行う。

• エンジン主要パラメータ

離陸中や巡航中などの飛行条件において飛行毎に主要パラメータを記録し，その変化傾向から異常の早期発見や劣化傾向の把握を行う。代表的な監視パラメータには排気温度や高圧・低圧系回転数，燃料流量がある。

(4)モジュール性能モニタリング

エンジンガスパスの各モジュールの性能を評価し，故障部位の特定や劣化診断などを行うもの。各エンジンメーカよりモニタリング・プログラムを用いたサービスが提供されている。

3.2　診断手法（ソフトウェア）

モニタリングにおいて，エンジン状態を正確に把握して故障の予兆検知や劣化診断による寿命予測を可能とするには，データ処理や診断を目的に応じていかに適切に設定できるかが重要となる。以下に，現在多く用いられている手法を挙げる。

(1)データベースド診断

蓄積された運用データから得られる情報を元に統計的・経験的に故障や劣化を予測する手法である。

(2)モデルベースド診断

エンジンガスパスやオイルシステムの動的物理モデルを構築し，センサ計測値や飛行条件（飛行速度や飛行高度など）を入力として，各モジュールの性能を推定し，劣化診断や故障検出・故障箇所の識別を行う手法である。モデルの推定には，最小二乗法やカルマンフィルタ，ニューラルネットワークなどを用いた手法が研究されている。

(3)ケースベースド診断

計測結果と故障事象の関連を蓄積し，診断を行う手法である。FMECA，ベイシアンネットワーク，ファジー理論，ニューラルネットワーク，エキスパートシステムなどの手法が研究されている。

(4)フュージョン

(1)～(3)の手法による診断結果の確からしさの向上や，誤った故障アラーム（False Alarm）の出力を減らすための技術として注目されており，以下のように計測から診断，意思決定まで各段階で情報の統合を試みるものである。

• 複数の異種センサを用いることにより診断確度向上
• モジュール間の特性相関を利用して診断確度向上
• 診断手法を組み合わせて診断結果から総合的に意思決定を行い診断結果の信頼性を向上

3.3　システム構成（ハードウェア）

モニタリングを実現するシステムは，次のようなハードウェアから構成される。なお各ハードウェアの名称は一般的な用語を用いたが，機種よって異なる名称で呼ばれている例もある。

• FADECおよびこれに含まれる制御用センサ/アクチュエータ，モニタリング用の追加センサ
• EMS（Engine Monitoring System；エンジン搭載モニタリング用システム）
• EICAS（Engine Indication and Crew Alerting System；機体搭載のエンジン状態監視システム）
• OMS（On-board Maintenance System；機上整備システム）
• 機上で取得したデータの処理を行う地上解析システム
• データ転送のための通信

エンジンサイズやシステム仕様，運用方法などのユーザのニーズに合せて，これらのハードウェアを組み合わせてモニタリングシステムを構成する。図３にシステム構成例を示す。

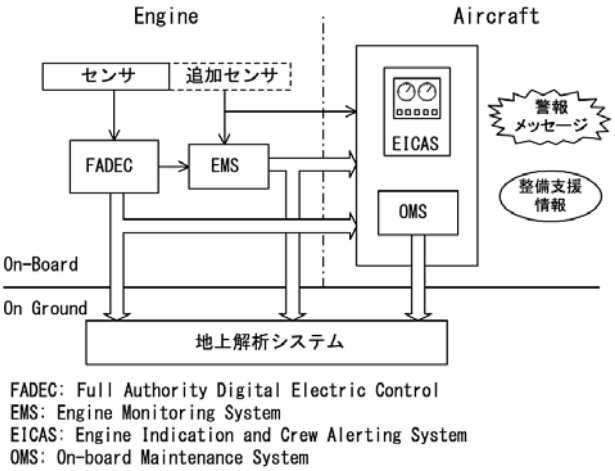


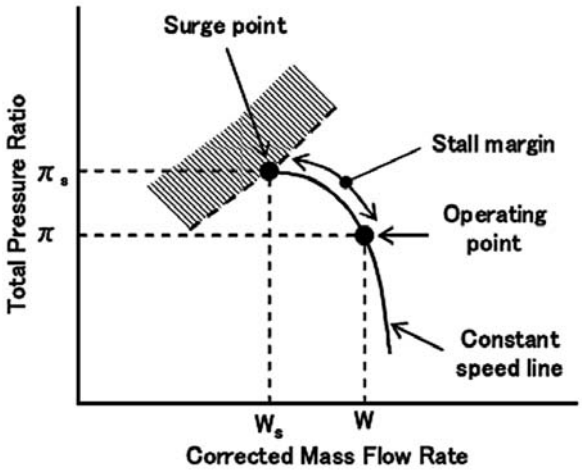
図３　モニタリングシステム構成例

ここでは，FADECシステムおよびEMSにて，制御用センサおよびモニタリング用の追加センサに対して故障診断やBITが行われ，診断結果に応じて故障情報や整備支援情報が機上システムへ転送される。機上では，これらの情報の表示や，オペレータによる監視およびエクシーダンスモニタリングが行われる。エンジンおよび機体搭載のシステムにて取得されたデータは，通信により地上解析システムに転送され，ユーセージデータの記録やトレンドモニタリングが実施される。

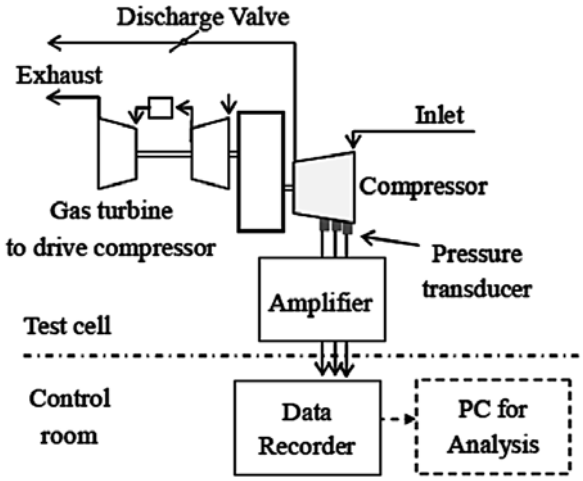
４．研究開発事例

前項までに述べてきたように，モニタリング技術に関する多くの実施例や研究テーマがあり，活発に研究開発が行われている。ここでは，ＩＨＩが取り組んでいるス

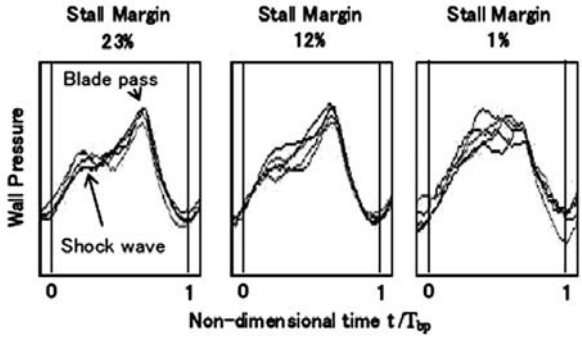
Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.



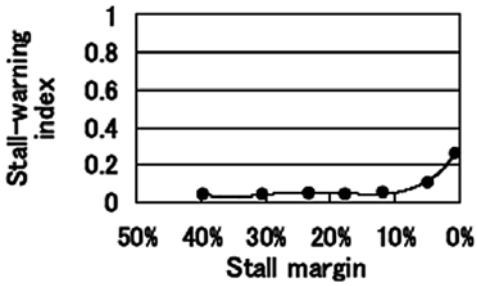
(a)ストールマージン模式図
（ここでStall Margin=((πs／π)・(W/Ws)−1)・100）



(b)リグ試験構成



(c)翼通過時間毎の圧縮機壁圧波形（90%修正回転時）



(d)ストールマージンに対するストール評価指標
図４　エンジンストール予兆検知システム[3]

トール予兆検知およびモデルベースドモニタリングの研究開発事例および新たな診断手法を採用したEHMシステムの実機による開発事例を紹介する。

4.1　ＩＨＩの取り組み事例

(1)エンジンストール予兆検知システム

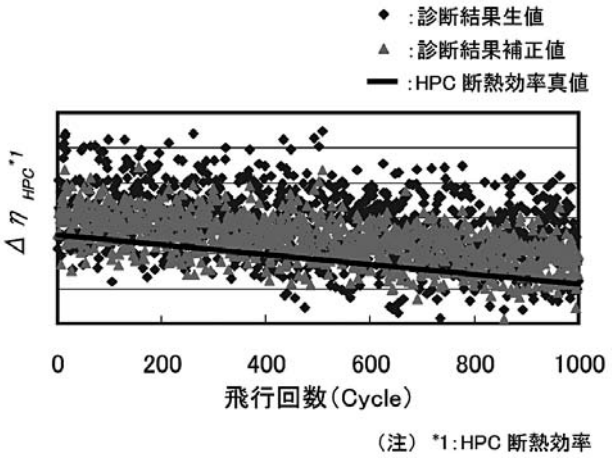
航空用ジェットエンジンの圧縮機ストールはエンジンの著しい性能低下を招き，推力損失や場合によっては飛行安全を脅かすサージに結びつく現象である（図４-(a)）。エンジンがストールする予兆の検知により，ストール回避による安全性向上や，ストールマージンから圧縮機の劣化を予測する性能モニタリングにより整備性・信頼性向上が可能となる。このために必要となるエンジンストール予兆検知システムの技術開発を，経済産業省が㈶日本航空機開発協会（以下，JADCと称す）に委託して実施した「航空機用先進システム基盤技術開発（高効率化システム）」の中の１テーマとしてJADCより受注し，ＩＨＩが担当した。本技術開発では，圧縮機壁圧を翼通過時間毎にサンプリングし，ストールに近づく過程での翼間圧力の相関を自己相関法によりストール評価指標として定量化し，予兆検知を行うアルゴリズムの評価を行った。

また，本アルゴリズムとセンサを含んだシステムの有効性がリグ試験により実証された（図４-(b)(c)(d)）[3]。この技術はまた，予兆診断にとどまらずアクティブストールといった制御への応用が検討されている。ヘルスモニタリングシステムとして実機に適用する上でいくつかの課題の克服が必要であるが，これによりストールマージンを減らすことで圧縮機の高効率・小型化の実現ができ経済性改善にも繋がる。

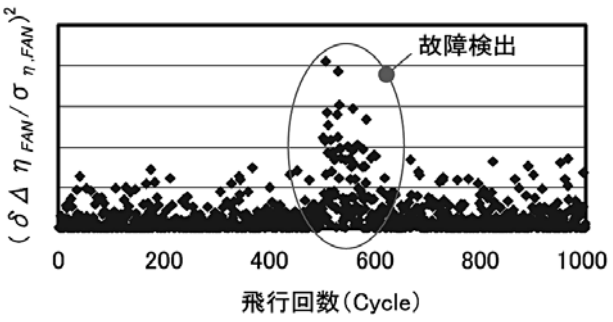
(2)モデルベースドモニタリング

２章で述べたように，エンジン劣化の状況を把握し故障発生時には修理・交換に必要な部位を特定することが，整備時間の短縮など整備性・経済性の向上に繋がる。そこで，エンジン各モジュールの劣化診断，故障検出ならびに故障モジュールの識別をする診断技術を開発した。これは，ダイナミックエンジンモデルを用いて計測値からモジュール特性（効率，流量など）を重み付き最小二乗法によって推定する海外エンジンメーカで実用されている方法を改良し，診断精度を改善したものである[4]。図５-(a)は，シミュレーションによって模擬した高圧圧縮機の劣化（図中でHPC断熱効率真値と記述）に対し，本診断結果あるいは飛行条件依存性を除去した補正値が飛行回数に従い低下していく断熱効率と一致し劣化傾向を診断できたことを示している。図５-(b)はファン模擬故障時（断熱効率の変動）の故障診断結果であり，診断指標の監視により鋭敏に故障を検出できることを確認した。実機データに適用して有効性を検証することや，診断精度を確保しながら診断に用いるセンサ数を削減することを実用に向けた課題としている。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.



(a)劣化診断結果



(b)ファン断熱効率故障診断指標

図５　モデルベースドモニタリング[4]

4.2　EHMの実機適用事例

NASAの研究事例では，EHMシステムの実機適用へ向けた取り組みが始まっている。このプログラムでは，フュージョンを取り入れたEHMシステムを適用したエンジンの飛行試験が実施され，エンジンモデルによるモジュール解析にニューラルネットワークやカルマンフィルタを統合したハイブリッドガスパス診断，エンジンの吸排気に含まれるガスパス・デブリ（金属粉）のモニタによるエンジン内部の磨耗診断などが検証されている[5]。

5．認証について

民間航空機に搭載される機器は，米国連邦航空局（FAA）による耐空性の認定を受けなければならない。またソフトウェアについては，FAAが指定するガイダンスであるRTCA/DO-178Bに従いソフトウェアライフサイクルプロセスを構築することが規定されている。エンジンモニタリングシステムは機能や範囲が多様であり，構成機器およびソフトウェアの機能損失によって航空機の飛行に致命的な影響を与えるものかどうかをFAA AC25.1309-1Aに規定されたシステム安全性評価過程によりシステムの故障確率と飛行安全への影響を評価しシステム安全性レベルを決定した上で，とりわけソフトウェアについてはDO-178Bに定義された，安全性レベルに応じた認証に必要な活動を実施していく必要がある。また，整備手順の設定に関わる場合などについては，FAA AC25-19に規定された手順に従い，耐空性を維持するための方法についても検討が必要である。

6．今後の課題

適切な整備の時期や修理箇所を特定する精度の高い診断結果を提供することと，その反面異常の誤検出を削減することの両立が必要である。また，実機適用に向けては技術面にとどまらない費用対効果の検討も必要となる。以下に今後の課題を列挙する。

・診断技術

飛行条件（高度，速度，大気温度など）や抽気・抽出力の変化に対する診断結果の補正，診断結果の信頼性評価手法の確立や，診断精度とセンサ数のトレードオフなどが課題である。

・計測技術

モニタリングを行うために従来計測していなかったパラメータを計測する必要が生じる場合もある。温度などの過酷な環境への対応や計測精度の向上，新たな原理による計測技術などが求められることも多い。例えば，ストールを検知するための高速圧力計測や，高温／粉塵／雨水に対応可能なセンサ，高周波に対応可能な振動計測などである。

・信号処理技術

モニタリングの対象や活用方法・診断手法により，それに応じた演算処理速度が必要となる。また取り扱うデータ量も増えることが予想され，無線通信を含めた機上から地上への伝送技術も今後の課題となる。

・診断手法の有効性評価

研究機関や企業でそれぞれ単独にEHM診断アルゴリズムの開発が行われているが，評価方法や診断対象として用いられるダイナミックエンジンモデルもそれぞれ異なるため有効性の比較が難しくなっている。最近では，共通のモデルや評価手法といったツールにより相対的な評価が行えるようなしくみ作りも始まっており，実機の運用データを持たない大学やエンジンメーカ以外の企業での研究開発も活発化すると考えられる。

・費用対効果の把握

技術開発と並んで実機適用に向けては，重量や部品点数の増加やEHMシステムの導入費用とメリットとの定量的把握を行い，ユーザのニーズに合うシステムを提案することが欠かせない。

7．まとめと将来展望

これまで述べてきたようにモニタリング技術においては，診断技術に加え運用や整備計画の最適化による経済性の向上を目指すEHMとしての取り組みが広がっている。技術分野も広範囲に渡り，ユーザであるエアラインや機体メーカの抱える課題や運用方法によりニーズも様々である。これらを十分検討し，EHMシステムを最

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

適に構築することが重要である。前項で述べてきたような種々の要素を選択して，効率的な整備方式を提案し経済性の高いエンジンを提供するためには，運用情報の共有やニーズ・シーズの把握，コスト・メリットバランスの評価などについて，エアライン，機体メーカ，エンジンメーカが様々な角度から協力して取り組んでいくことが重要である。また，モニタリングに用いられる技術はエンジン制御へ応用できる転用性の高い技術も多く，例えばオンラインエンジンモデルによる適応制御やアクティブ制御などの研究との相乗効果も期待される。最終的には高効率化や小型軽量化によるさらなる経済性や安全性の向上という形でユーザへ還元できるものであると考える。

謝辞

４項で紹介したモデルベースドモニタリング研究は経済産業省の民間航空機基盤技術プログラムの一環として独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの助成を受けて実施したものである。本研究の実施に当たりご指導とご協力をいただいた関係各位のご厚誼に対し，深く感謝の意を表します。

参考文献

(1) Air Carrier Financial Reports (Form 41 Financial Data), The Bureau of Transportation Statistics (BTS), USA, (2007).
(2) Maintenance cost and reliability, Airbus Fast 39, (2007).
(3) Nakakita,T., Kurosaki,M. and Kamiyoshihara,Y., EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A STALL PREDICTION SYSTEM USING A TRANSONIC MULTISTAGE COMPRESSOR, ASME GT2007-28199, (2007).
(4) 中北智文，他，インテリジェント化技術，ＩＨＩ技報，47-3 (2007-9), pp121-126.
(5) Volponi, A.J., Brotherton,T., Luppold,R., Simon,D.L., Development of an Information Fusion System for Engine Diagnostics and Health Management, NASA TM-2004212924, ARL-TR-3127, (2004).
(6) SAE ARP 1587B, Aircraft Gas Turbine Engine Health Management System Guide, Aerospace Recommended Practice, (2007).

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

特集：ガスタービンの保守管理と信頼性向上技術

高温部品の保守計画作成支援システムの開発

藤井　智晴*1　FUJII Tomoharu
藤岡　照高*1　FUJIOKA Terutaka

キーワード：ガスタービン，高温部品，保守計画，部品管理

1．はじめに

ガスタービンの動静翼や燃焼器といった高温部品は，高温の非常に厳しい環境で使用されるため，き裂，減肉，変形，コーティングはく離などの多くの損傷が発生する。このため，頻繁に部品の保守（検査，補修，交換等）を行うことで，その健全性を維持している。また，高温部品には，最新の鋳造技術，冷却技術，コーティング技術等が適用されているため，従来の火力発電機器の部品よりも一般的に高価であり，部品コスト低減の観点からも，管理寿命まで効率的に使用することが望まれる。さらに，高度な技術が適用された高温部品の補修には，数ヶ月を要する場合もあり[1]，この場合は，通常の点検期間中に補修作業を完了することが困難となる。

このような状況に対し，ガスタービンを保有する電力各社では，効率的な部品運用を行うために，いくつかの予備品セットを用いた部品のローテーション計画を作成している[2]。部品をローテーションで使用することで，部品の点検や補修に必要な期間を別途確保することが可能となり，点検期間の短縮が可能となる。また，一般的に高温部品には，メーカーにより推奨される管理寿命が設定されているが，部品をこの管理寿命近くまで使用し，廃却時の余寿命（ここでは管理寿命から累積の運転履歴を差し引いた値の指す）をできる限り少なくするローテーション計画を作成することで，部品コストを低減させることができる。しかし，ローテーション計画の作成時には，ガスタービンユニット毎の点検計画や運転計画，部品種類毎の予備品数や補修日数，個別部品毎の使用履歴や余寿命等を考慮して試行錯誤を行う必要があり，多大な労力が必要となる。

このような状況の下，財団法人電力中央研究所では，ローテーション計画作成を支援するとともに，部品の在庫管理や寿命管理も効率的に行い得るシステム（以下，本システム）の開発に取り組んでいる[3]-[6]。本稿では，本システムを中心に，ローテーション計画作成を効率的に行うための機能や，ローテーション計画を基にした保守コスト評価例について紹介する。

原稿受付　2008年11月７日
＊１　財団法人　電力中央研究所　エネルギー技術研究所
プラント工学領域
〒240-0196　神奈川県横須賀市長坂２－６－１

2．高温部品の管理・運用方法

2.1　高温部品の管理方法

１台のガスタービンに組み込まれる高温部品の数は500～650程度と膨大である[2]。また，高温部品には，管理寿命が設定されており，すべての部品の使用履歴や余寿命を管理するためには，多大な労力が必要となる。これに対し，部品種類毎にガスタービン１台分の部品数を１つのセットとして，セット単位で管理を行うことで，部品の管理に対する労力を低減することができる。しかし，１つの部品セットの中に，使用履歴や余寿命が異なる部品が含まれる場合には，その部品セットの運用が，部品セットの中で最も余寿命が短い部品に依存することになり，効率的な部品運用を妨げることになる。また，部品を個別部品単位で管理することにより，労力は必要となるが，より効率的な部品運用が可能となり，部品コストの低減が期待できる。

部品の寿命管理においても，いくつかの方法が採用されている。我が国では，起動回数等の影響を実運転時間に加味した等価運転時間による寿命管理が主流であるが，実運転時間や起動回数に対して，それぞれの制限値を設け，その制限値に到達する前に補修や交換を行う方法もある[7]。また，近年，静翼などの静止部品に対して見られる方法であるが，運転履歴ではなく，補修回数に制限値を設けて，補修履歴により寿命を管理する場合もある[8]。

2.2　高温部品のローテーション計画

図１に部品セットを基本にした部品ローテーション計画図の例を示す。ガスタービンのユーザーである電力各社およびメーカーにおいても，部品の管理および運用計画作成支援のためのシステム開発の実施例[2],[9]があるが，計画図の基本的な構成は，図１とほぼ同様である。図の横軸には年度が表示されており，縦軸にはガスタービンのユニット名および予備品セット名が表示されている。つまり，この例の場合は，６つの部品セットによるロー

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

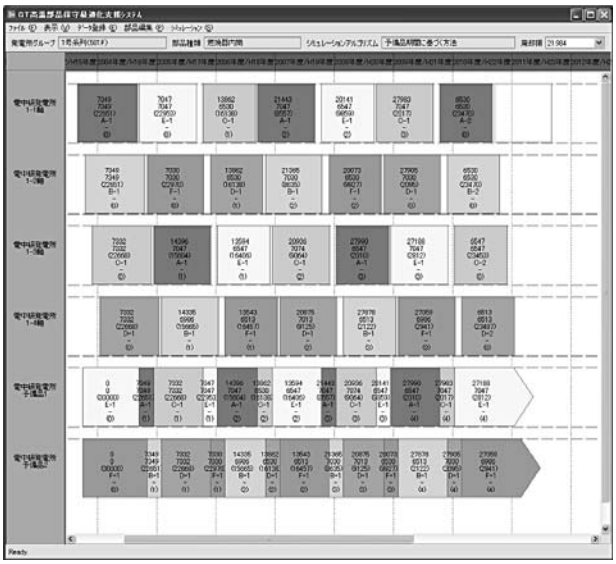


図１　部品ローテーション計画図の例

テーション計画となる。色分けされた横棒は，個々の部品セットを表しており，その長さは，それぞれの部品セットが各ユニットで使用された期間を示している。また，横棒の上には，部品セット名や当該部品セットに対する累積運転時間等の情報が記載されている。さらに，横棒と横棒の間の空白部分は，点検期間を示しており，この点検期間中に，それまでユニットに取り付けられていた部品セットが予備品セットと交換されることになる。取り外された部品セットについては，補修等が行われ，その後は，予備品セットとして，次回の組み込みに備えることになる。このようなローテーションを繰り返し，部品の管理寿命近くに到達した場合，または，次回の点検までに十分な余寿命が無い場合は，その部品セットは，廃棄または貯蔵品となり，新しい部品セットが導入される。このローテーション計画を基に，部品の管理や運用に対する各種コストを算出する事も可能となる。

3．本システムの機能概要

3.1　ローテーション計画の作成機能

図２に本システムによるローテーション計画の作成手順を示す。本システムでは，各ユニットに対して，最低１回分の入力値があれば，将来の計画を自動かつ短時間で作成することができる。この際，ユーザー個別の制約事項を反映させるための各種条件設定が可能である。設定可能な項目の一覧を表１に示す。まず，自動で計画作成を行うためのアルゴリズムとしては，４種類の方法があり，①待機時間が長い予備品セットから優先して使用する方法，②余寿命が短い予備品セットから優先して使用する方法，③同じ部品セットを連続して使用する方法，④遺伝的アルゴリズム[10]などユーザー独自の外部プログラムを使用する方法から選択可能である。次に，部品リグルーピングとは，ユーザーが設定した期間毎に，部品セット内の各部品の組み合わせを自動的に変更し，余寿命の近い部品同士で部品セットを再構成する機能である。図３に部品リグルーピング機能の概念を示す。この機能により，部品セット内に使用履歴が異なる部品が含ま

表１　ローテーション計画作成時に設定可能な項目

項目	概要
計画作成アルゴリズム	• 部品ローテーション計画を自動作成するためのアルゴリズムを設定
点検計画・運転計画	• ローテーション計画を作成する年数を設定 • 将来の点検計画（点検開始日，期間等）および運転計画（運転時間，起動回数等）を設定
コスト変化	• 将来的な部品購入費用と補修費用の変動幅を設定
部品リグルーピング	• 部品セット内の部品の組み合わせを変更する条件を設定 • 取り付け位置があらかじめ決められている特殊部品の位置を設定
部品購入計画	• 将来的な部品購入計画（購入予定日，数量等）を設定
部品着脱条件	• 部品交換の対象となる点検種別（定期点検，燃焼器点検等）を設定
部品取り付けユニット	• 取り付けユニットがあらかじめ指定されている部品を設定
部品寿命	• 補修の実施による部品寿命の延伸条件を設定
部品購入方針	• 部品が不足した場合の方針（新規部品購入，補修期間短縮）を設定

図２　本システムのローテーション計画の作成手順

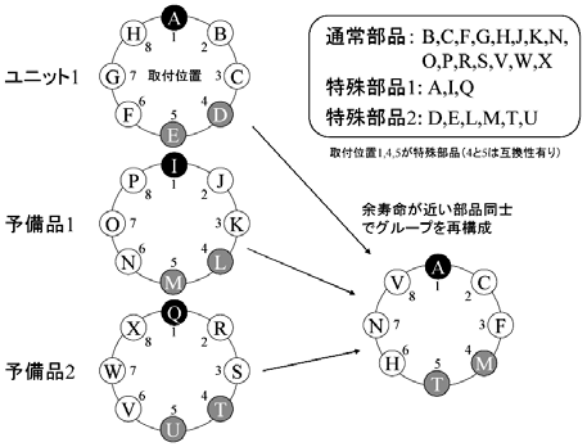


図３　部品リグルーピング機能の概念

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

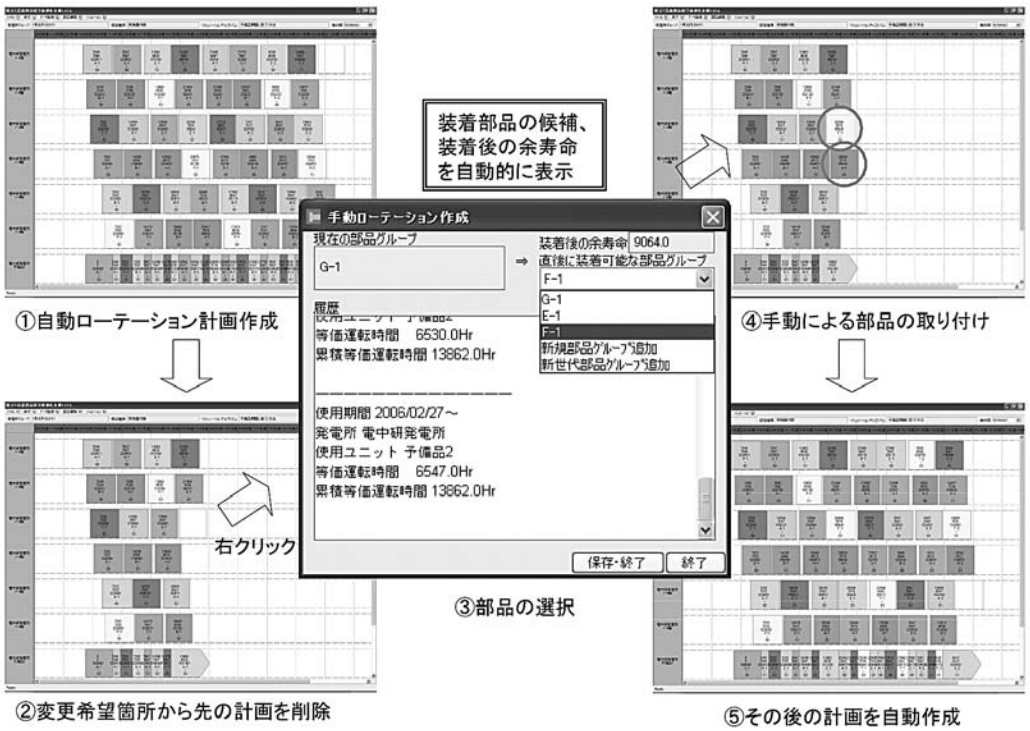


図４　手動による計画修正手順

れる場合にも，無駄のない部品運用が可能となる。また，この際，あらかじめ取り付け位置が決められている特殊部品の存在についても考慮することが可能であり，互換性のある部品同士で交換を行うことができる。

計画の作成後には，年度毎に補修費用や部品費用を確認することができる。また，本システムでは，計画作成期間全体に対して，以下の式で定義される部品廃却時の損失（部品廃却損）も計算され，計画の良否を判断するための指標となる。

部品廃却損＝Σ（部品の購入価格×廃却時の余寿命／管理寿命）

また，実際の発電所の部品運用では，様々な制約事項があり，単一のアルゴリズムでは対応できない場合も多いと考えられる。このため，本システムでは手動による計画作成・修正機能を実装している。図４にこの機能の手順を示す。手動で計画を修正する際には，取り付け候補となり得る部品セットのリストが自動的に表示される。このように自動と手動による計画作成機能を組み合わせることで，ユーザーが望む最適な計画を短時間で作成することが可能となる。

3.2　部品の管理機能

高温部品の管理において，ユーザーは，部品のシリアル番号，管理寿命，余寿命，取り付け位置，補修履歴などを細かく記録する必要があり，膨大な数の高温部品の管理は容易ではない。また，部品セット単位ではなく，個別部品単位での管理の場合は，部品セット内の１つ１つの部品の組み合わせまで考慮する必要がある。

表２　本システムで管理可能な項目

管理情報	項目
仕様情報	仕様番号
	仕様名称
	材質
	コーティング材料
コスト情報	購入費用
	補修費用
補修情報	補修に必要な期間
	補修時期
	補修判定値
寿命管理情報	管理寿命
	寿命管理法
	等価運転時間計算式
	補修回数の制限値
その他	取り付け位置
	購入手配期間

表２に本システムで管理可能な項目を示す。これらの項目は，個別の部品に対して，任意の時期に変更可能である。また，部品の寿命管理法としては，等価運転時間，実運転時間，起動回数，補修回数のいずれかを基準とした方法を選択可能である。図５に本システムの部品管理画面の一例を示す。ローテーション計画図上の任意の部品セットを指定することで，その時点における各部品の状態を確認することができる。また，図６のように一覧表形式で，部品セット内の状態を確認することも可能で

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

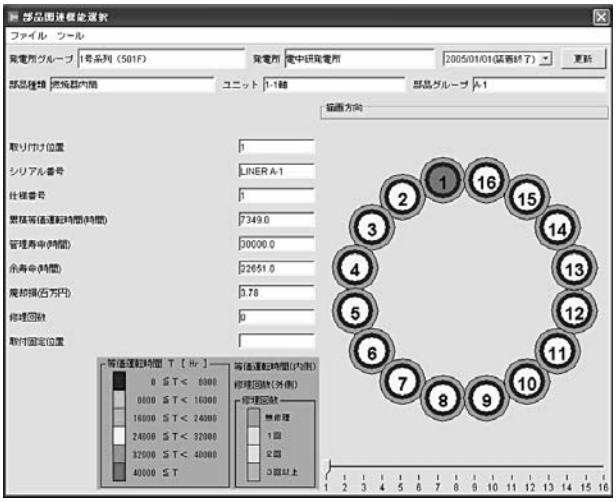


図５　部品管理画面（燃焼器部品の例）

図６　部品管理画面（一覧表形式）

ある。この画面では，例えば，寿命の管理値を変更することや，部品の使用履歴を確認することができる。また，部品セット内の個別部品は，任意に交換することが可能である。

3.3　その他のユーザー支援機能

本システムでは，計画作成機能や部品管理機能の他にも，ユーザーの支援となる様々な機能を実装している。例えば，あらかじめ部品の納期を設定しておくことで，ローテーション計画図上の新規部品に対して購入手配時期を表示することができる。また，大量の部品データを入力する際に，複数の部品に対して共通するデータを一括入力する入力支援機能等がある。

なお，本システムで取り扱うデータはすべてCSV形式で出力することが可能であり，計画作成後の部品データやコストデータを，ユーザーが独自に加工することができる。

4．本システムによる保守コスト評価例

4.1　使用したデータについて

文献[(1),(11)-(18)]を参考に，実際の発電所の運用条件を模擬したデータを作成した。表３にこのデータ一覧を示す。発電所の構成としては，ガスタービン4台，予備品２セットとした。つまり，計６セットによる部品ローテーション計画となる。図７に部品ローテーション計画図の初期状態を示す。最初に１号機と２号機が順次運転開始となり，１年半程度の後に，３号機と４号機が順次運転開始となることを想定し，１号機の運転開始当初から２セットの予備品を所有することとした。それぞれのユニットに対して，運転開始から１年後に定期点検が行われ，その後は，２年に１度の定期点検と，定期点検と定期点検の間の年に燃焼器点検が行われることを想定した。

これらのデータを使用して，実際の発電所でも起こり得る３つのケースについて，各種コストの評価を行った。

表３　コスト評価に使用したデータ

ガスタービン	４台
予備品	２セット
予定運転時間	6,000時間／年
予定起動回数	120回／年
定期点検	２年に１回実施（50日／回）
燃焼器点検	２年に１回実施（15日／回）
検討対象部品名	燃焼器内筒
部品数	16個／セット
購入コスト	500万円／個
補修コスト	50万円／個
補修に必要な日数	90日
部品の管理寿命	35,000時間（等価運転時間）
等価運転時間の換算係数	20

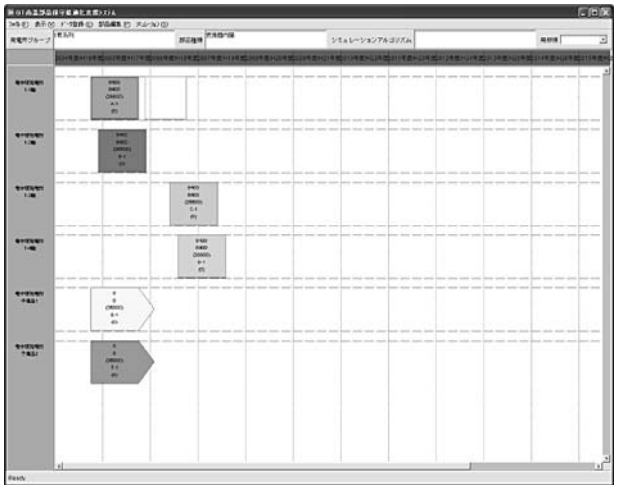
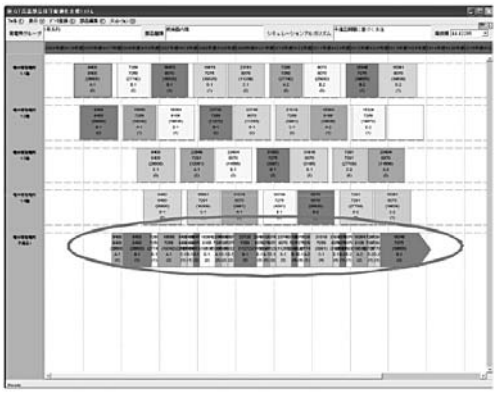


図７　ローテーション計画図の初期状態

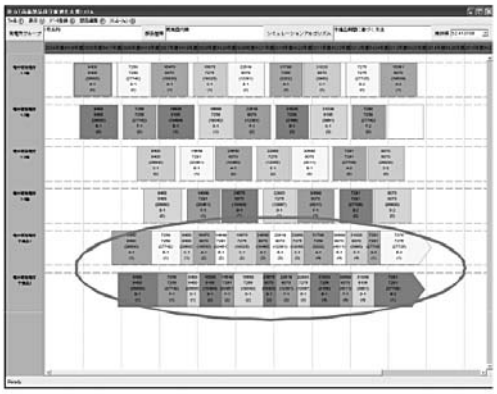
4.2　最適な予備品セット数を検討する場合

効率的なローテーション計画を作成するためには，予備品に対するコスト（数と導入時期）を検討しておく必要がある。また，この場合には，その発電所独自の運用形態や点検計画を加味した検討が必要である。このため，部品の補修に必要な日数をパラメータとして，必要な予備品セットの数と導入時期を決定するための検討を行った。本システムには，自動ローテーション計画作成にお

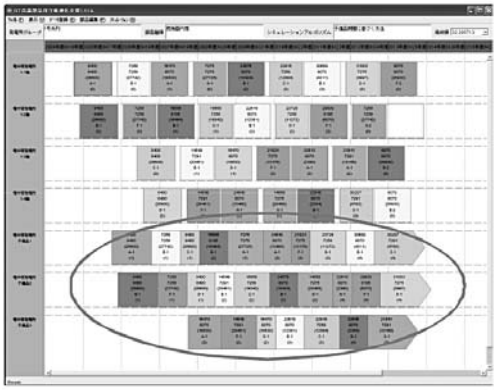
Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.



（a）補 修 日 数　30 日



（b）補 修 日 数　90 日



（c）補 修 日 数　150 日

図８　必要な予備品セット数の検討結果

いて，予備品セットが不足する場合に，自動的に予備品セットの数を増加させる機能がある。この機能を利用して，予備品セットが全く存在しない状態から自動ローテーション計画作成を開始し，それぞれの場合に必要となる予備品セット数と導入時期を確認した。

部品の補修に必要な日数を30日，90日（表３の条件に相当），150日とした場合の，ローテーション計画図を図８に示す。丸印を付けた部分が，予備品セットを示している。この結果から，補修に必要な日数を30日とした場合には，予備品は初期の段階から１セットで十分であるが，90日とした場合は２セットが必要となり，150日とした場合は３セットが必要であることが分かった。また，150日とした場合には，最初の２年間は予備品が２セットで十分であるが，３年目に３セット目の予備品を導入する必要があることが分かった。

4.3　点検開始日の変更の影響を検討する場合

実際の発電所では，運用上の都合により，点検計画の変更が必要になる場合がある。ここでは，当初の点検計画から，一部計画の変更がある場合を想定して，点検計画の変更がローテーション計画や各種コストに及ぼす影響を検討した。条件として，１号機の第２回定期点検の開始日が３ヶ月繰り延べになる場合を想定した。ただし，繰り延べされた３ヶ月間も，表３と同様の条件で運転が行われるものとし，その後の点検計画には変更がないものとした。

点検計画変更後のローテーション計画図を図９に示す。丸印を付けた部分が点検開始日の変更箇所であり，点検計画変更前の計画図は図８の(b)と同じである。

点検計画変更前後の部品廃却損の比較を表４に示す。なお，部品の購入費用と補修費用については，点検計画変更前後で変化はなかった。この結果，点検開始日が繰り延べされた定期点検以降のローテーション計画は変更されたが，部品廃却損としては，３万円の減少（燃焼器内筒１缶の購入費用の0.6％）であった。つまり，このケースでは，点検開始日が繰り延べされても，各種コストへの影響が少ないことを示す結果となった。

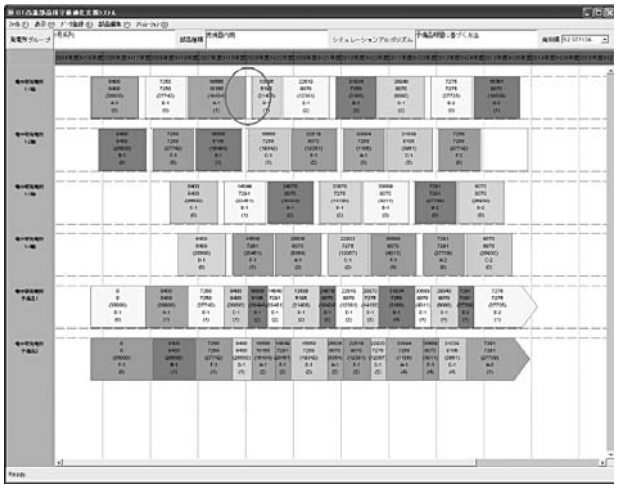


図９　点検計画変更後のローテーション計画図

表４　点検計画変更前後の部品廃却損の比較

	変更前	変更後
部品廃却損（百万円）	52.41	52.38

4.4　最適な補修時期を検討する場合

高温部品においては，通常，メーカーが推奨する補修基準に到達するまで損傷の傾向管理が行われ，その基準に到達した時点で補修が行われる。ここでは，将来的に，

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

表５　補修コストの設定条件

補修時期	１回当たりの補修コスト（百万円）		
	ケースA（補修コスト小）	ケースB（補修コスト中）	ケースC（補修コスト大）
管理寿命の20％以降の点検で補修（基準条件）	0.5（100％）		
管理寿命の40％以降の点検で補修	0.625（125%）	0.75（150%）	1.0（200%）
管理寿命の60％以降の点検で補修	0.75（150%）	1.0（200%）	1.5（300%）
管理寿命の80％以降の点検で補修	0.875（175%）	1.25（250%）	2.0（400%）

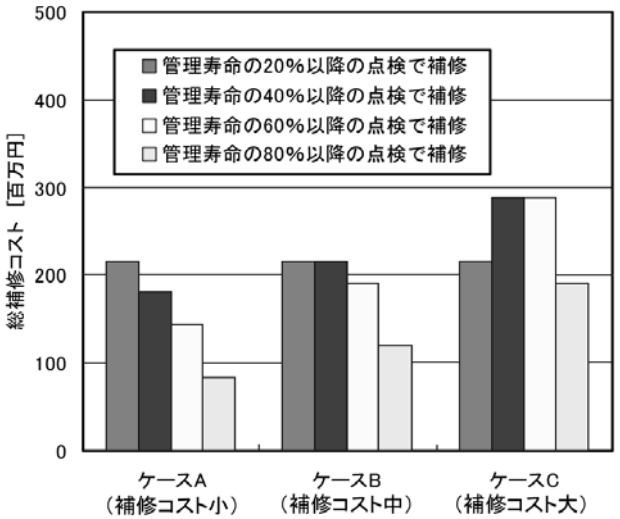


図10　総補修コストの試算結果

補修基準の緩和により，補修時期をユーザーが任意に決定することが可能になった場合を想定して，補修時期の変更が総補修コストに及ぼす影響を検討した。なお，一般的に，部品を長い期間（運転時間が長いことや起動回数が多いことに相当）使用すると，損傷の規模が大きくなり，それに応じて，補修に必要な費用が増加するものと考えられる。このため，表５に示すように，補修のタイミングが遅いほど，補修に必要な費用が高くなる条件を設定した。なお，この表における基準条件とは，表３で示した条件に相当する。また，仮定する補修費用の大小が，結果に影響を与えることが予想されたため，３種類の補修コストのパターンを設定して検討を行った。

総補修コストの試算結果を図10に示す。この結果，補修時期を遅らせるほど，総補修コストが低下する傾向が見られたが，ケースCの場合には，一部にこの傾向の逆転が見られた。つまり，実際の保守においては，このような事前検討により，総補修コストとのバランスを考慮の上，補修時期を決定する必要があると考えられる。

５．おわりに

ガスタービン高温部品に対するローテーション計画の作成を支援するシステムを中心に，効率的な計画作成のために必要な機能や，計画に基づくコスト評価例について紹介した。本稿が，高温部品の保守コストの低減や，保守担当者の労力低減の一助となれば幸いである。

参考文献

(1) 傍嶋正夫，第32回ガスタービンセミナー資料集，(2004-1)，p.95
(2) 小池高雄，岩狭幸男，日本ガスタービン学会誌，29-5，(2001-9)，p.32
(3) 藤井智晴，藤岡照高，所健一，高橋毅，森永雅彦，高橋俊彦，電力中央研究所報告，W02014，(2004-3)
(4) 所健一，藤井智晴，藤岡照高，森永雅彦，高橋俊彦，電力中央研究所報告，R03012，(2004-3)
(5) 藤井智晴，藤岡照高，電力中央研究所報告，M06003，(2007-3)
(6) 藤井智晴，藤岡照高，電力中央研究所報告，M07008，(2008-3)
(7) Balevic, D., Burger, R., Forry, D., GER-3620K, (2004-12)
(8) 火力原子力発電技術協会編，火力原子力発電，54-11，(2003-11) p.1418
(9) 堀田都，荒木憲司，森友嘉一，市川国弘，遠藤孝夫，CAOフロンティア2003，(2003-9)
(10) 黒田充，村松健児，：経営科学のニューフロンティア11 生産スケジューリング，(2002)
(11) 遠藤幸男，大内一紘，火力原子力発電，46-10，(1995)，p.2
(12) 浅田豊靖，半戸俊明，平岡進，山本芳幸，久玉俊郎，火力原子力発電，46-10，(1995)，p.14
(13) 鬼頭一郎，可児研一，火力原子力発電，46-10，(1995)，p.24
(14) 久川壽彦，安藤宣雄，大川令，火力原子力発電，46-10，(1995)，p.32
(15) 水城肇，西園英俊，今井庸三，火力原子力発電，46-10，(1995)，p.46
(16) 畠中康博，廣岡進，火力原子力発電，46-10，(1995)，p.56
(17) 石丸豊彦，日本ガスタービン学会誌，29-1，(2001)，p.3
(18) 三野真司，火力原子力発電，54-8，(2003)，p.25

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

特集：ガスタービンの保守管理と信頼性向上技術

ガスタービン高温部品の寿命延伸技術

酒井　義明[*1]　SAKAI Yoshiaki
佐藤　岩太郎[*2]　SATO Iwataro
斉藤　大蔵[*3]　SAITO Daizo

キーワード：ガスタービン，高温部品，寿命延伸

1．はじめに

ガスタービンを用いたコンバインドサイクル発電設備は,低炭素社会へ向けたCO_2の削減，エネルギ利用の高効率化・経済性の向上という市場要求に対応して増加している。ガスタービンは，作動流体として高温燃焼ガスをもちいることから，燃焼器や動静翼などの高温ガス通路部部品（以下，高温部品と略記）は，高い熱応力や遠心力が作用する過酷な環境で使用されることから，蒸気タービンの部品とは異なり高温酸化や熱応力による損傷を受けやすく比較的短い時間で補修，交換が必要となる。そのため，定期的な補修と交換をしながら運用していく。高温部品は高価であることから，修理・再生を繰り返しながらできるだけ長く使用していくことはランニングコスト低減，環境負荷低減の観点から有効であり，交換インターバルの延長につながる補修技術や，寿命再生，長寿命化という寿命延伸技術が求められている。東芝は，この課題を解決するために，高温部品の余寿命診断技術，寿命延伸技術の開発に取り組み，実用化につなげている。ここでは，これらの技術開発状況について紹介する。

2．余寿命診断技術

ガスタービンの高温部品は，使用環境が厳しいことから図１に示すような劣化損傷を受ける。これらの劣化損傷を運転中や定期点検（以下，定検と略記）時に正確に把握し，継続使用・補修･再生･廃棄等を決定する的確な判断が求められる。その手段として，信頼性が高い寿命診断技術が必要不可欠となるが，高温部品の寿命は様々な要因に影響されるため，普遍的な診断技術の開発は困難である。そのため，実際の運用状況を解析・評価し，さらに，実際の劣化・損傷状況に基づいた寿命診断技術の開発が重要となる。

当社の余寿命診断手法では，独自開発した材料劣化診断技術，部品損傷診断技術，シミュレーション解析技術

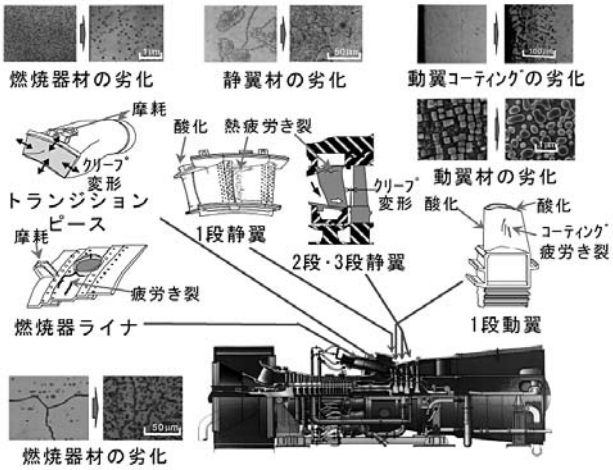


図１　ガスタービン高温部品の主な損傷事例

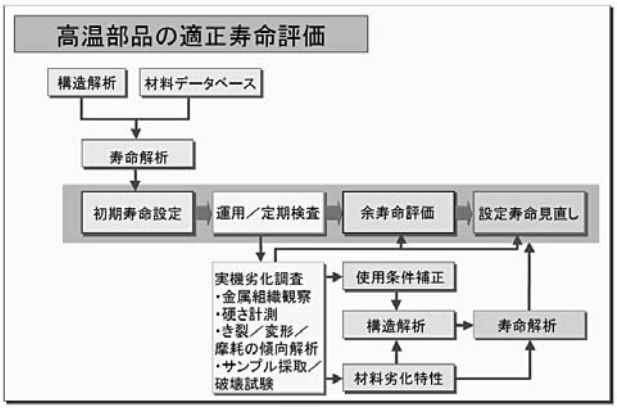


図２　高温部品の余寿命診断フロー

を従来からある有限要素法（FEM）解析や破壊調査（クリープ強度，引張強さ，耐力，疲労強度等）の手法と補完併用することにより精度良い診断を可能としている[(1),(2),(3)]。具体的には，図２に示すように，運用後の定検において，実機で運転した高温部品を用いて，金属組織観察，硬さ計測，き裂/変形/摩耗の傾向解析，サンプル採取/破壊試験による実機劣化調査，により余寿命評価をおこない，部品寿命を支配している寿命因子を見極める。その結果により，寿命を延伸するために有効な修理を選定，効果を構造解析および寿命解析により確認し

原稿受付　2008年11月18日
＊1　㈱東芝　電力システム社　火力・水力事業部
〒230-0045　横浜市鶴見区末広町２丁目４番地
＊2　㈱東芝　電力システム社　京浜事業所
＊3　㈱東芝　電力システム社　電力・社会システム技術開発センター

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

て，最適な修理内容の提案を行うとともに設定寿命の見直しを行う。

3．最新寿命延伸技術

ガスタービン高温部品は過酷な環境下で使用されるため，比較的短い時間での劣化損傷による寿命消費を避けることはできない。このため，高温部品の再生・長寿命化を目指し，新しい寿命延伸・補修技術の開発に取り組み，実用化をすすめている（図３）。

図３　ガスタービン寿命延伸・補修技術

3.1　動翼寿命延伸補修技術

3.1.1　動翼寿命延伸技術BLE Process™ (注1)

動翼の寿命延伸技術であるBLE Process™(注１)（BLE：Blade Life Extension）のコンセプトを図４に示す。修理基準を満たせば，動翼を繰り返し再生することが可能である。

ガスタービン動翼は，運転経過と共にクリープ損傷が進行し，寿命を消費する。この劣化した動翼に対して1,000℃・1,000気圧以上の高温高圧下にて特殊熱処理を行うことにより，初期鋳造欠陥に加え，高温下の運転で経年的に材料劣化し，その結果，発生するクリープボイドを消滅させるとともに内部金属組織を再生させるHIP

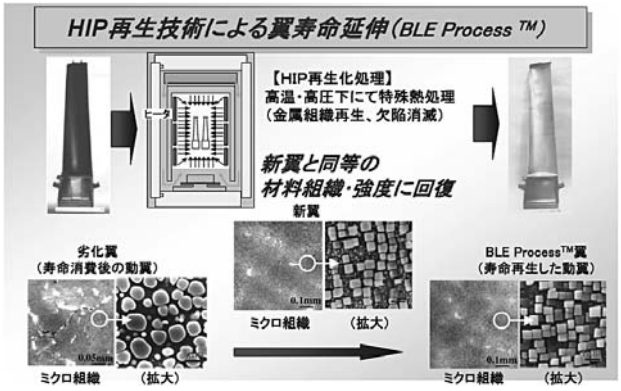


図４　BLE Process™のコンセプト

(注1) BLE Processは，東芝の商標。
(注2) WRAPは，GE社の商標。

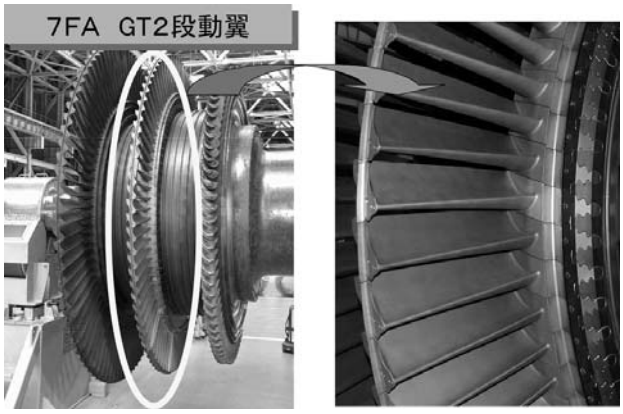


図５　BLE Process™翼の実機組込状況

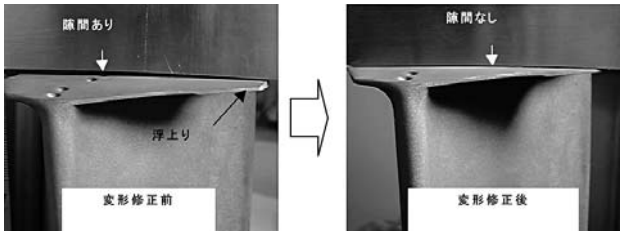


図６　動翼チップシュラウド部の変形修正

（Hot Isostatic Pressing）再生化処理技術を当社独自に開発しており，実機適用している[(4),(5),(6)]。これまでの技術検証では，材料強度が新翼以上の状態まで回復することを確認している。1,100℃級ガスタービン（９E／７E型）動翼や1,300℃級ガスタービン（７FA型）の動翼にて実機適用され，良好に運転中である（図５）。また，動翼の先端部では，経時的なクリープ変形が発生することがあるが，これらの変形を修正する技術も開発しており，HIP再生化処理と併用して適用することにより，その動翼としての寿命延伸効果を最大限に活かすことが可能となっている（図６）。

3.1.2　動翼への高性能遮熱コーティング

高温酸化からガスタービンの動翼基材を保護するために，翼外表面及び冷却空気通路内面は耐酸化コーティングする。また，動翼基材の温度を低減し，長寿命化をねらいとして遮熱コーティングを採用している。さらに，気孔率を制御し従来の遮熱コーティングより格段に遮熱性能が優れ，基材の劣化を抑えて延命化を図る高性能遮熱コーティングの開発をすすめている（図３）。

3.1.3　動翼の溶接補修

ガスタービン動翼は高温の遠心力場で使用されるため，高温強度が高いNi基合金を採用している。しかし，1,300℃級ガスタービンでは第１段動翼の先端部が高温酸化で減肉する事象が認められている。このNi基合金は難溶接材であるが，近年の技術開発により翼先端部の補修に限り溶接補修による再生が可能になっている。GE社により開発された溶接割れを防止する新しい溶接法（WRAP™(注2) 溶接）は，高温でのNi基合金の材料特性を利用したもので，動翼先端部の補修に適用し，動翼の

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

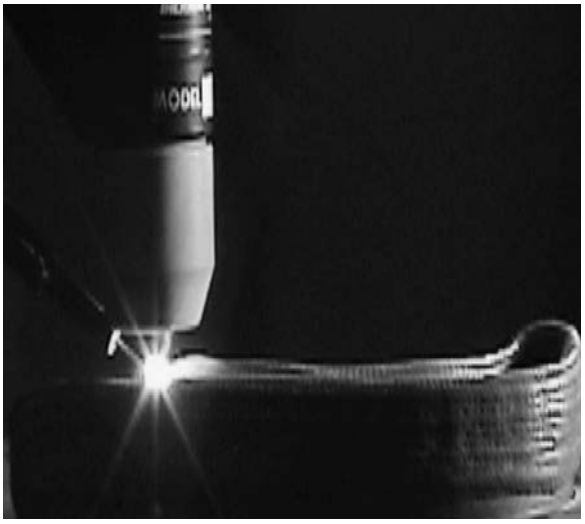


図７　ロボットによる動翼溶接補修

再利用率改善に効果を挙げている。さらに，ロボットによる自動溶接補修も開発され，実機適用されている（図７）。また，カスタマイズした修理メニューも準備している。これにより，修理範囲も必要最低限とし，修理コスト低減と納期短縮に寄与している。

3.2　静翼寿命延伸補修技術

ガスタービン第１段静翼では，熱疲労により多くのき裂が生じる。また，局所的に高温酸化による減肉が生じることもある。従来の技術では，修理前にき裂・酸化減肉部分の除去が必要であり労力を要していた。さらに，補修量の増加と共に溶接による入熱が大きくなるため，翼の変形が増大し組み込みが困難となる事象が発生するケースもある。この問題に対して，損傷形態によらない補修として，き裂，減肉を，同時に全面補修可能であり，広範囲な補修でも変形なく，高品質な補修を実現する修理方法として拡散ろう付け補修を開発し，実機適用している[(4),(5)]。また，オプションとして，HIP処理も必要に応じて適用し，信頼性の向上が可能である。

拡散ろう付け補修は，基材と同等の合金粉末とろう材粉末の混合補修材料を補修部に充填後，真空中で拡散熱処理を施すことにより補修部を基材と同等レベルにする修理方法である（図３）。

3.3　燃焼器寿命延伸補修技術

3.3.1　燃焼器ライナの耐摩耗処理・再生熱処理

燃焼器部品の支持部や他部品との取合部では，燃焼振動や機械振動により激しい摩耗が発生し，この摩耗が点検時期を決定する因子となっている。従来に変わり，耐摩耗処理（CrCコーティング）（図８）を適用することにより大幅な改善が実現され，摩耗率が従来の１／５以下に低減している。また，燃焼器部品は長時間の運用により材料劣化するが，再生熱処理による寿命延伸が可能であり，実機適用し効果をあげている。

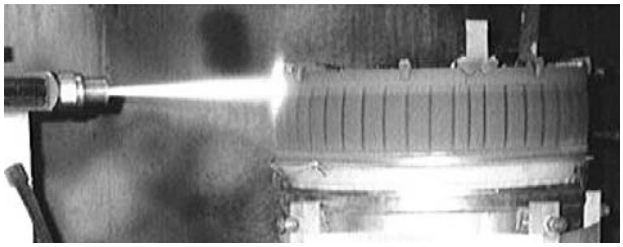


図８　燃焼器ライナへの耐摩耗処理（高速ガス炎による溶射）

3.3.2　燃焼器ライナのクーポンリペア

燃焼器ライナは，薄肉構造であることからプラントの特性により燃焼振動が大きい場合，変形，破損に至るケースもある。変形が大きく出るケースの場合，冷却を強化した厚肉タイプのスリーブに交換する耐力強化型クーポンリペアメニューも開発をすすめ実機に適用している（図３）。

3.3.3　トランジションピースのクーポンリペア

1,300℃級FA型ガスタービンにて，トランジションピースの軸方向変形が，燃焼器ライナ間，静翼との組立不良，シール不良を引き起こし，寿命支配因子となっている。本変形に対しては，静翼との取り合い部であるピクチャーフレームをクーポンリペアにより修正し，寿命を延伸することが可能である。また，材料劣化に対しては，燃焼器ライナ同様，再生熱処理による寿命延伸が可能であり，実機適用している。

4．あとがき

1,100℃級，1,300℃級ガスタービンの運用実績の蓄積とともに，高温部品の寿命支配因子が明らかになりつつあり，寿命延伸技術も確実に進歩しつつある。ガスタービン高温部品の寿命延伸技術は，高額なガスタービン補修費の低減，資源の有効活用による環境負荷低減に大きく貢献することから，今後も，これらの開発を推進・整備し，市場要求に対応していく。

参考文献

(1)　近藤卓久，石井潤治，酒井義明，ガスタービン改良保全技術，東芝レビュー，56, 6 , 2001, p.37-40.

(2)　Yoshioka, Y., et al. Gas Turbine Hot-Gas-Path Components Maintenance and Life Assessment Technology. Proceedings of the 23rd CIMAC International Congress on Combustion Engines, 2001, p249-256.

(3)　酒井義明，ほか，ガスタービンメンテナンスの最新技術の紹介，東芝レビュー，60, 12, 2005, p.24-27

(4)　石井潤治，ガスタービンの最新補修・寿命延伸技術，火力原子力発電，53, 7 , 2002, p.62-71

(5)　石井潤治，ガスタービン高温部品の補修技術，日本ガスタービン学会誌，29, 5 , 2001, p.18-23

(6)　伊藤明洋，ほか，HIP処理によるガスタービン動翼材の特性回復，火力原子力発電，53, 3 , 2002, p.71-76

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

特集：ガスタービンの保守管理と信頼性向上技術

ガスタービン翼の材料劣化とバーチャルジェットエンジン構想

福田　雅文*1　FUKUDA Masafumi
原田　広史*1　HARADA Hiroshi
横川　忠晴*1　YOKOKAWA Tadaharu
小泉　　裕*1　KOIZUMI Yutaka
北嶋　具教*1　KITAJIMA Tomonori
木村　智人*1　KIMURA Tomohito

キーワード：ガスタービン，タービン翼，劣化，微細組織，gas turbine，turbine blade，degradation，microstructure

1．はじめに

二酸化炭素による地球温暖化問題そして近年の化石燃料価格の上昇は，これまで我々が築いてきた社会の規範まで変えそうなほどに，その影響をさまざまな分野に及ぼしている。これらの変化の中核に位置するガスタービンやジェットエンジンでは従来から熱効率向上による二酸化炭素削減，燃費の改善が追及されてきたが，今後その要求はさらに強くなると考えられる。タービン入口温度向上は要求に応えるための最も有効な手段の一つである。タービン入口温度はガスタービンが実用化された1950年代から毎年約10℃ずつのペースで向上してきた。その背景には冷却技術や材料技術の進歩があることは言をまたない[1]。しかしながら，燃焼ガス温度が1500℃程度まで上昇してきた現在のガスタービンやジェットエンジンでは高温部における材料の劣化は避けがたい現象である。本論では最近のガスタービンやジェットエンジンのタービン翼に生じている劣化の状況を紹介するとともに，コンピュータ上でガスタービンやジェットエンジンの運用をシミュレートし，材料劣化を予測するバーチャルジェットエンジンの構想について述べる。

2．劣化損傷の全体像

図１にガスタービンに発生する代表的な損傷を示す[2]。高温燃焼ガスを生成する燃焼器ではクリープ，摩耗，疲労等による変形や亀裂が生じる。燃焼器で生成された高温，高圧の燃焼ガスに曝されるタービン翼ではクリープ，疲労，酸化，腐食等により変形，亀裂等が発生する。燃焼器や高温タービン翼にはセラミックスによる熱遮蔽コーティングが施されることが多く，酸化，熱応力等によるコーティングの剥離も生じる。

以下，動静翼について劣化の具体的な例を挙げて紹介する。

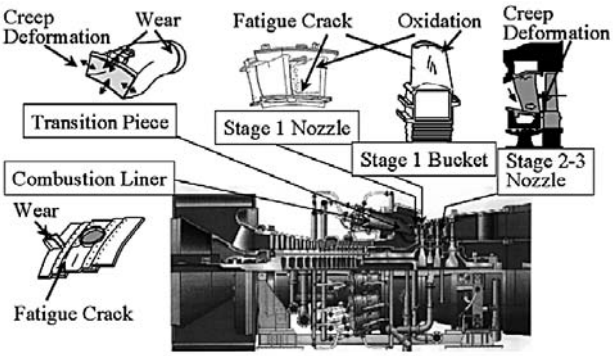


図１　ガスタービンの損傷箇所と劣化[2]

3．翼劣化の例

3.1　翼基材微細組織の変化

高温タービンの翼母材にはNi基超合金が多く用いられている。Ni基超合金は一般に面心立方格子のγ相にNi_3Alのγ'相が析出した金属組織を有している。γ'相はガスタービンでの使用温度域では規則相（それぞれの格子点に入る元素が決まっている）なので，材料の変形を促す転位の移動が起こりにくい。また，一般にγ'相の格子定数（結晶格子の大きさ）はγ相とは異なるのでγ相とγ'相との界面には歪が生じ，応力が発生する。そのため，材料の硬さが増すとともに転位の移動が界面により妨げられ，引張強度やクリープ強度等が向上する。

しかしながら，高温での長時間の使用によりγ'相は次第に変形し，粗大化する。例えば，吉岡等[2]は図２に示すような関係を得ている。図の左上側に使用前翼のγ相とγ'相を示す。図中で四角形の組織がγ'相であり，γ'相以外の部分がγ相である。高温での長時間の使用により右上側の図のようにγ'相は粗大化し，球状に変化する。下側のグラフには温度をパラメータとして時間とともにγ'相が粗大化する様子を示している。縦軸はd^3-d_0^3であり，粗大化前のγ'相の体積からの増加分

原稿受付　2008年11月10日
＊1　物質・材料研究機構　超耐熱材料センター
〒305-0047　つくば市千現１－２－１

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

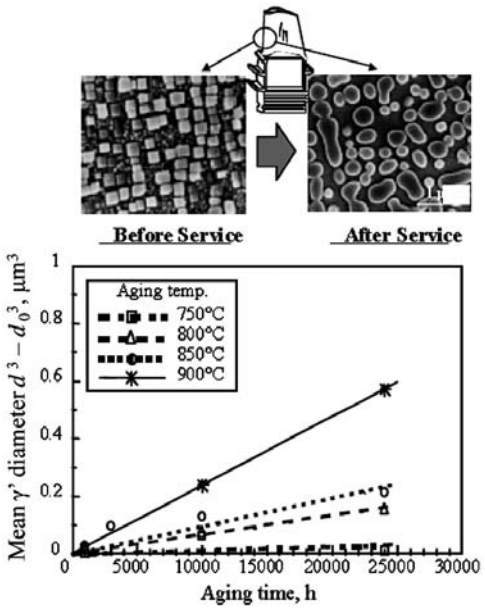


図２　動翼母材における γ'層の劣化[2]

を示している。ここでdは γ'相の平均直径，d_0は粗大化前の γ'相の平均直径である。750℃の条件では25,000時間でもほとんど粗大化しないのに対し，900℃では急速に粗大化していることがわかる。粗大化と共にクリープ変形が進み，翼としての寿命を消費して行くことになる。γ'相が粗大化した翼は熱処理により再生が可能な場合がある。吉岡[3]によると，多結晶合金において，溶体化処理を兼ねた高温高圧での熱間静水圧プレス（HIP, Hot Isostatic Pressing）で結晶粒界に発生したクリープボイドを潰すとともに微細組織を均質化し，それに引き続き時効処理を行うことにより製造時と同等の γ'相が得られたとしている。

近年導入が進んでいる単結晶超合金や一方向凝固超合金では，様子がかなり異なり，実機での使用中に γ/γ'相が層状に重なるように変形するラフト化が起こる[11]。図３はEpishin等[4]が報告している12,700時間の運転後の小型ガスタービンの無冷却翼であり，材料は単結晶

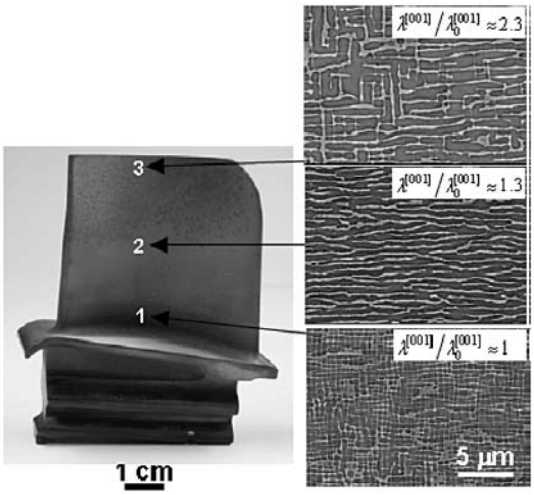


図３　運転後の単結晶合金（CMSX-4）の γ/γ'組織[4]

（CMSX-4）である。数字の１で示した翼有効部の根本では γ'相の形状は図２の使用前と同じように四角形をしている。しかしながら，数字の２で示した平均径の部分では横縞状に γ 相（白い筋）と γ'相（灰色の部分）が重なっており，筋の方向は翼の遠心応力の方向に垂直である。これが典型的なラフト組織である。製造時に遠心応力がゼロの状態では四角形で安定的だった γ'相だが，使用中には高温化で遠心応力がかけられるので，この状態での安定的な形態に変化したものと考えられる。ラフト化は粗大化と同様に翼の寿命が消費されていく段階での現象のひとつであるが，横向きに伸びた γ/γ'の界面では変形の原因となる転位の移動が妨げられ，遠心力方向のクリープ変形が抑えられる効果があるとされており，クリープ破断寿命の延伸に貢献するものと考えられている[5],[6]。一方，図４に700℃での疲労試験中に欠陥から発生し，ラフトの縞に沿って進んだ亀裂を示す[4]。このように疲労強度から見るとラフト化による強度低下も指摘されている。ラフト化した単結晶翼も溶体化処理と時効処理により製造時に近い γ'相を回復できるとした文献[7]と特許[8]がある。

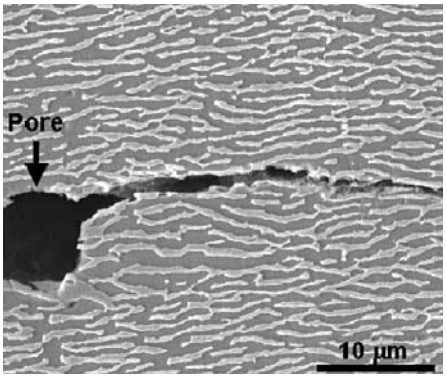


図４　欠陥から発生し，ラフトに沿って進んだ亀裂（700℃疲労試験）[4]

3.2　翼表面コーティングの劣化

高温タービン動翼では，表面の耐酸化性，耐腐食性を確保するために一般にコーティングが施されている。吉岡等[9]は1100℃級ガスタービン実機で使用した第１段動翼の調査を行った。図５は蛍光浸透探傷の様子で，この翼の表面にはPt-Alコーティング（表面に白金を電気メッキし，その上にアルミを拡散コーティングしている）が施されている。左側は19,201時間使用したものであるが，翼の腹側面には縦方向の細い亀裂が観察される。さらに，38,171時間使用したものでは亀裂が拡大している。図６には亀裂の断面を示すが，先端はコーティングを突き抜け母材まで達していることが分かる。Pt-Alコーティングは翼の高温腐食対策を目的に1970年代に導入されたものであるが，上述のような問題が生じた。そこで，溶射タイプのCoCrAlYコーティングに変更されたが表面酸化が問題となり，さらにCoCrAlYの上にアルミを拡

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

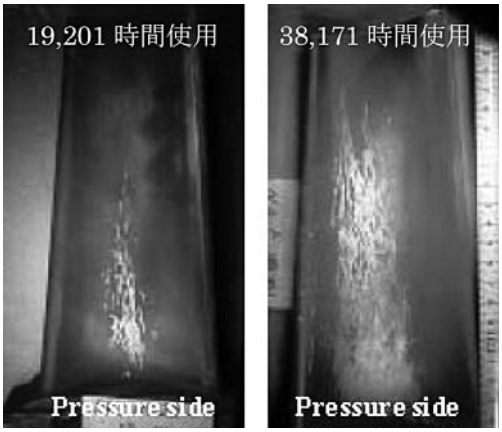


図 5　Pt-Alコーティング[9]

図 6　20,000時間使用後のPt-Alコーティング翼に生じた亀裂[9]

散コーティングしたCoCrAlY+Alコーティングに変更された。しかしながら，CoCrAlY+Alでも表面の亀裂が問題となり，最終的にCoNiCrAlYコーティングへと変遷した。図 7 にはCoCrAlY+Alコーティング翼の12,585時間，22,131時間使用後の様子を示すが，Pt-Alコーティング同様に縦方向の亀裂があることがわかる。それに対し，図 8 の左側に示したCoCrAlYコーティング翼では亀裂はわずかであったが，表面付近に局所的に厳しい酸化およびTiNの針状組織が見つかっている。右側は11,127時間使用後のCoNiCrAlYコーティング翼であるが，表面亀裂はほとんど観察されず，酸化や針状組織等もなかったと報告されている。さらに，それぞれのコーティングについて別途 3 点曲げ試験により亀裂が発生する歪を比較したところ，Pt-Al，CoCrAlY+Alコーティングは他より少ない歪で亀裂が入ることがわかった。アルミ拡散コーティング層の延性から脆性に変化する温度（DBTT，Ductile-Brittle Transition Temperature）は650～950℃であり運転中のコーティング層の温度程度である。これらのことから，Pt-Al，CoCrAlY+Alコーティングの最表面にある脆いアルミ拡散コーティング層にガスタービン停止時等の冷却中に引張熱応力が作用し，亀裂が発生したものと推定された。

3.3　熱遮蔽コーティングの劣化

高温な燃焼ガスに曝される翼には表面にセラミッ

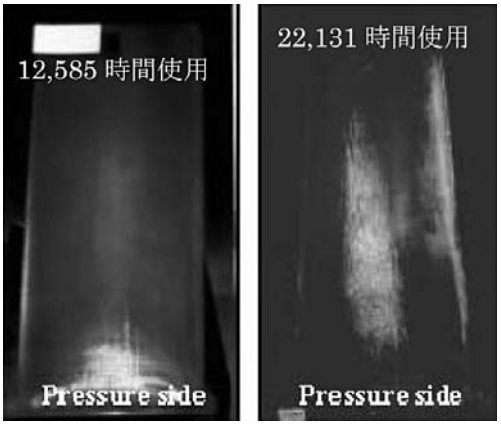


図 7　CoCrAlY+Alコーティング[9]

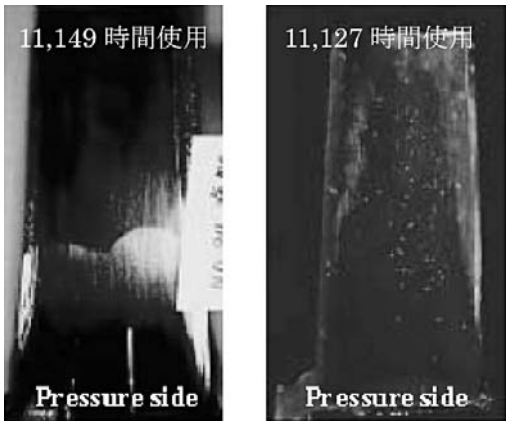


図 8　CoCrAlYコーティング，CoNiCrAlYコーティング[9]

クスの熱遮蔽コーティング（TBC, Thermal Barrier Coating）を施すことが多い。図 9 はボーイング777-300に使用されていたプラット&ホイットニー社製PW4090エンジンの第 1 段静翼であり，大沢等[10]により詳細に解析された。この静翼はNi基合金基材上に，ボンドコートおよび電子ビーム蒸着（EB-PVD）による部分安定化ジルコニア･トップコートの熱遮蔽コーティングが施されており，背側のTBCが剥離し，合金基材にクラックが発生していた。飛行記録によれば､翼は総飛行時間4,341時間，総飛行回数3,510回使用されていた。 1 飛行当た

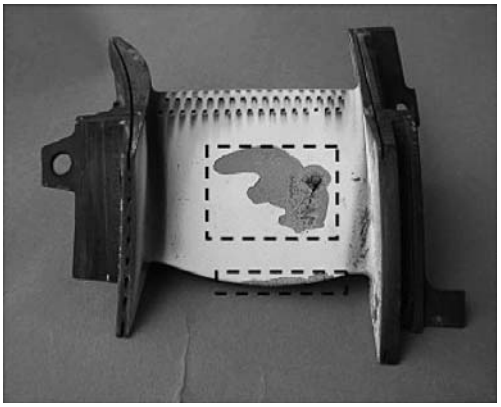


図 9　遮熱コーティングが剥離した静翼[10]

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

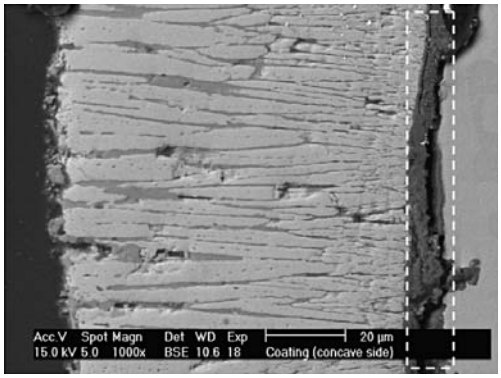


図10　典型的なトップコート－TGO－ボンドコート[10]

りの平均飛行時間は1.2時間程度であり，主として国内線で使用されていたものと考えられる。

高温での使用によりトップコートとボンドコートの間にはTGO（Thermally Grown Oxide）と呼ばれる酸化物が生成することが多い。図10にその様子を示しており，白い点線で囲んだ部分がTGOであり，TGOとボンドコートの界面は剥離している。剥離には各層の線膨張係数の違いが効いていると考えられている。因みに，Ni基合金基材の線膨張係数は15（$10^{-6}K^{-1}$），ボンドコートは13～15，TGOは７，トップコートは10程度であり，温度が上昇すると層間に大きな熱応力が発生すると考えられる。加えて，TGOは成長時に体積が膨張し，その結果周囲の応力が増加するために，剥離が起こると推測されている。また，TGO中には亀裂や空孔のような欠陥がしばしば観察され，空孔が亀裂の起点となっている可能性がある。これらのことから，線膨張係数の違いによりボンドコートはガスタービン停止時等の冷却時に大きな引張応力を受け，欠陥から亀裂が進展する。そして，亀裂の中にもTGOが生成し，TGOの体積膨張により亀裂が進展するといった剥離メカニズムが示唆されている。

図11に翼の腹側や先端部のトップコートと堆積したスケールを示す。スケールからはトップコート中に亀裂が進展しており，さらに進むとトップコート表面の剥離に至ると考えられる。スケールには空気中のカルシウム，マグネシウム，アルミニウム，シリコン（CMAS）以外に鉄，ニッケルが混入し，これらは上流の圧縮機や燃焼器から飛来したものと推測される。スケールは，航空機が巡航中に堆積したものと考えられ，スケールの化学組成から，離陸時に発生する最高温下ではスケールの一部が溶出している可能性が高い。巡航中や着陸後にはスケールは凝固しており，トップコートとの線膨張係数の差で生じる熱応力が亀裂生成の一因となると推測されている。また，溶融したスケールはトップコートの焼結を促進するため，トップコート表面の焼結に起因する収縮もクラック生成の一因になると考えられた。

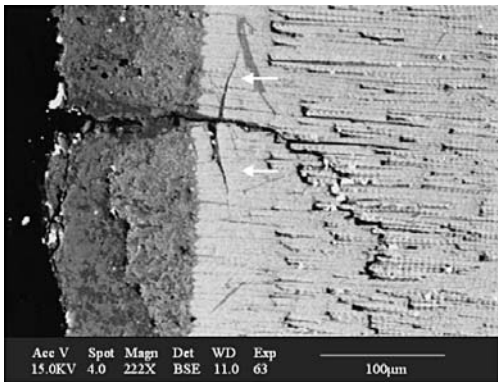


図11　翼堆積物とそこから延びる亀裂[10]

3.4　冷却空気が流れる翼内面の劣化

翼の劣化は高温ガスに曝される外面だけではなく，冷却空気が流れる翼内面にも見ることができる。木村等[11]はボーイング747などに搭載されているGE社製CF6の第１段動翼の内面を詳細に調査した。図12に翼の外観を示すが，総使用時間は40,671時間，総飛行回数は4607回である。その間１回補修しており，表面はリコーティングされている。内面はアルミ拡散コーティングされている。この翼では内面の冷却空気通路のR部に多数の亀裂が観察された。図13(a)はR部に発生したものである。亀裂の深さは100μm以下のものが多い。(b)，(c)に示すようにリブやフィルム冷却孔周辺にも同様な亀裂が観察されている。冷却通路表面は冷却により引張応力が作用し，航空機の飛行毎に繰り返される。また，3.2節でも述べたようにアルミ拡散コーティングは比較的脆く，亀裂はR部等熱応力が出やすい場所に多く発生していることから，脆い材料に繰り返しの引張応力がかかったことが原因の一つと推測される。

図14(a)は亀裂部断面のSEM（走査型電子顕微鏡）写真である。亀裂の内部には酸化物層が形成されてい

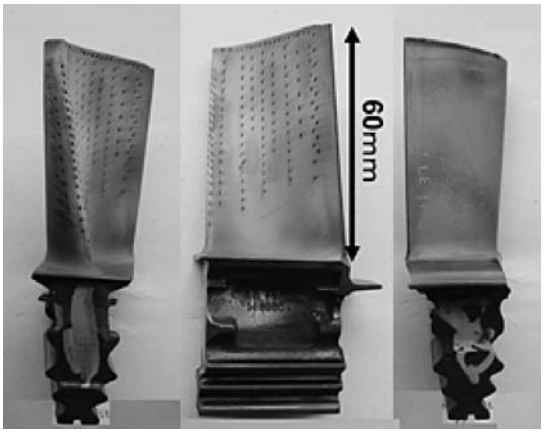


図12　使用後の動翼[11]

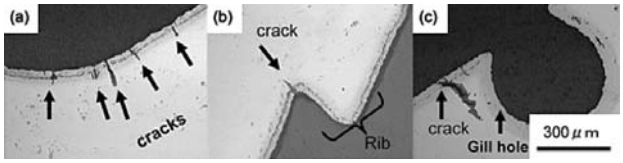


図13　冷却空気通路に発生した亀裂[11]

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

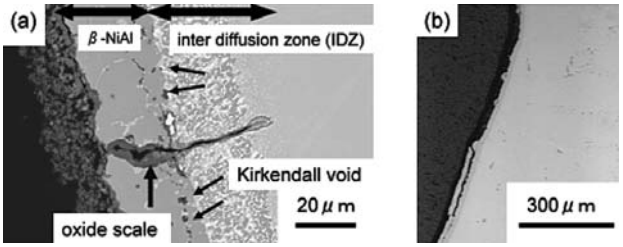


図14　冷却空気通路に発生した亀裂[11]

る。冷却通路面には酸化物が生成し，その右側にアルミ拡散コーティング層（β-NiAl 層）が形成されており，それに伴い基材中に相互拡散層（IDZ，Interdiffusion Zone）が生成している。β-NiAl 層と基材との間にはカーケンダルボイド（コーティング層と基材における合金元素の拡散速度が違うため生じる空孔で，この場合Alが急速に基材に拡散し，Alの抜けた後が空孔として残った。）が発生し，このカーケンダルボイドに沿って，翼の表面と平行な方向に亀裂が進展している。これらの亀裂は生成すれば，図14(b)のようにコーティング層の剥離を誘発する。

3.5　硫化腐食による劣化

製造時の不具合により問題を生じたケースが小泉等[12],[13]により報告されている。図15はプラット&ホイットニー社製PW4000シリーズエンジンから取り外された高圧タービン第２段動翼であり，製造時の残留物が原因で硫化腐食により損傷を受けたとされている。翼の材料は，単結晶Ni基超合金PWA1484である。微細組織は，A-A'断面の位置で，図16-gのように翼内部冷却が十分でγ/γ'相が整然と並んで初期組織が残存している部分と，図16-a～fのようにγ'相が粗大化しているところが観察された。粗大化してγ/γ'相に乱れが生じているところは他部位より高温になっていたことが推測できる。特に図16-aの部位ではクリープ強度低下の原因となる針状のTCP相（Topologically Close Packed Phase）が析出していた。図16-dに見られるように翼後縁部の組織粗大化も明らかとなり，うまく冷却がされていなかったと

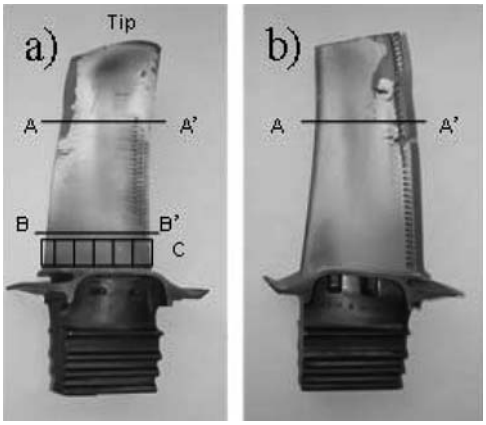


図15　損傷を受けた高圧第２段動翼[12],[13]

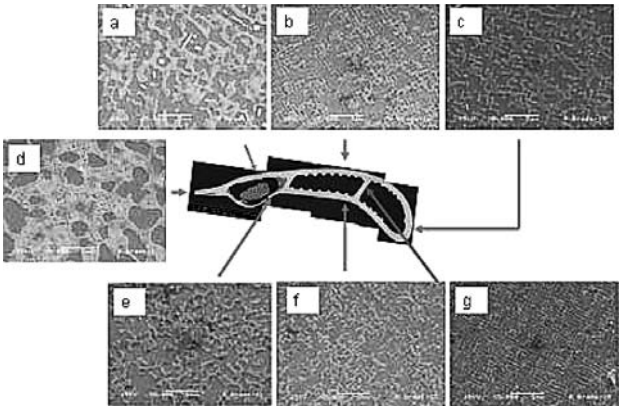


図16　動翼断面の組織観察[12]

推測された。B-B'断面では冷却翼内面に生成した酸化物の内側に硫化物が検出された。また，検出された硫黄元素はいずれも基材の内部に存在していた。つまり硫化腐食が先行し，それを追う形で後から酸化が起こっているものと考えられた。硫化物に関しては，950℃以上の高温では塩が揮発性となることが知られているので，タービン動翼で硫黄元素が検出されたところは950℃以下であったと推定された。

上述の例では，製造過程での硫黄分混入が劣化の原因だったが，発電用ガスタービンでは燃料中の硫黄による翼外面の硫化腐食が古くから問題となっている。また，最近，ジェットエンジンで大気中の硫黄酸化物が腐蝕の原因となる可能性が指摘されている。

いくつか最近の翼劣化事例を紹介したが，まとめると以下のようになる。

①翼基材微細組織の変化
　高温，応力場でのγ'粗大化，ラフト化
②翼表面コーティングの劣化
　高温下でのコーティングの酸化
　非定常熱応力とコーティングの脆性による亀裂
③熱遮蔽コーティングの劣化
　高温下でのTGO（酸化物）生成による剥離，亀裂の発生／進展
　表面に堆積したスケールとの熱応力によるトップコート表面の剥離
④冷却空気が流れる翼内面の劣化
　非定常熱応力とコーティングの脆性による亀裂
　カーケンダルボイド発生によるアルミ拡散コーティングの剥離
⑤硫黄による腐食
　翼内（外）面に残存または付着する硫化物による硫化腐食

4．バーチャルジェットエンジン構想

物質・材料研究機構では1999年から「新世紀耐熱材料プロジェクト」の一環としてバーチャルガスタービンの

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

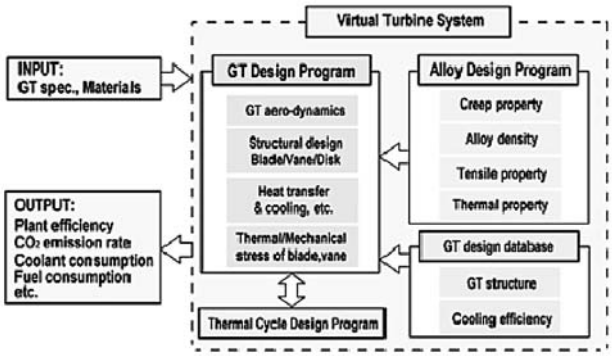


図17　バーチャルガスタービン[18]

開発を進めてきた[14],[15],[16],[17]。図17に示すように，バーチャルガスタービンは出力，タービン入口温度等のガスタービン基本仕様および材料仕様を入力とし，自動的にガスタービンの基本設計を行い，ガスタービンの空気・燃焼ガス通路部形状，必要冷却空気流量や設計点熱効率，二酸化炭素排出量等を出力する計算システムである[18]。このシステムにより，物質・材料研究機構では開発した材料を用いることによる熱効率向上の効果を評価してきた。その成果をもとに，物質･材料研究機構は2004年からバーチャルジェットエンジンの開発に取り組んでいる[18]。バーチャルジェットエンジンは既存（または仮想）のジェットエンジン（またはガスタービン）の形状および運用パターン（燃料，飛行速度，高度，時間等）を入力とし，各部の温度，圧力，エンジン性能，材料の劣化状態等を出力する計算システムである。計算システムの中は図18に示すようにジェットエンジンまたはガスタービン内部の流れ，熱，構造計算と材料組織変化等の計算から構成されている。具体的な計算フローを図19に示す。従来のエンジンシミュレータは空力計算，エンジン性能に主眼を置いていた。バーチャルジェットエンジンでは従来の機能に加え，材料面に着目し，クリープ，酸化，組織変化，転位挙動等に関する計算モデルを融合し，エンジン部材の劣化を計算できるようにすることが目標である。図20は組織変化を計算した一例であり，γ'相が粗大化

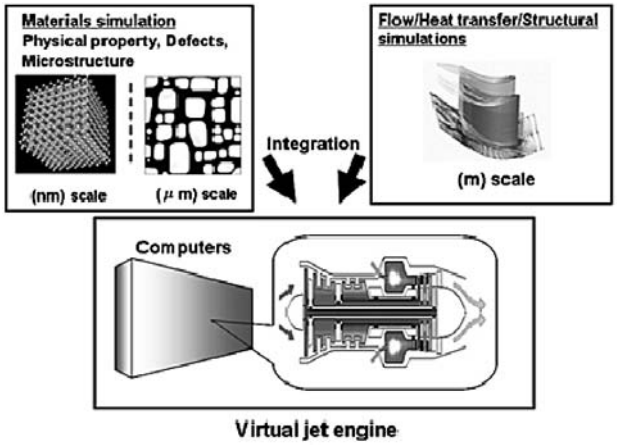


図18　バーチャルジェットエンジンの概要[18]

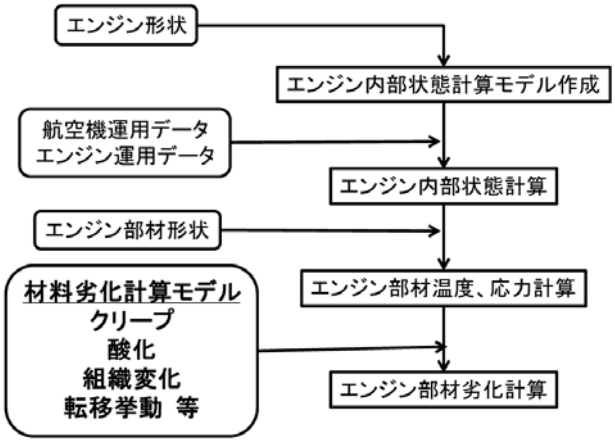


図19　バーチャルジェットエンジンの計算の流れ

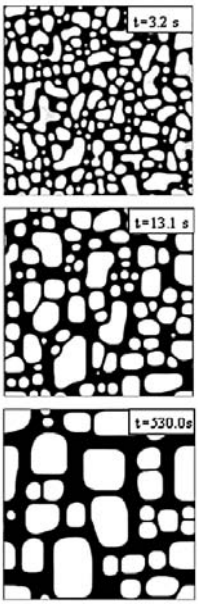


図20　計算されたγ/γ'相の形状変化[18]

していく過程を表現している[18]。システム構築は緒についた段階であるが，今後，実機のデータを反映しつつ上述の計算モデルを作成していく予定である。

5．おわりに

ガスタービン，ジェットエンジンの高温部に使われる翼の劣化とバーチャルジェットエンジン構想について概説した。翼の劣化は温度，応力が変化する中で，基材，コーティング材料の変形，酸化，腐食，組織変化等が進む極めて複雑な現象である。そのため，より安全なエンジンを提供するには，実機の劣化翼解析に基づいた現象の正確な理解が欠かせない。そして，その結果を反映するバーチャルジェットエンジン計算システムはより優れた材料を開発する上で有用なツールになるものと考えている。

6．謝辞

本論をまとめるにあたって，㈱東芝の吉岡洋明氏から

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.

は資料を提供してもらうと共に貴重な助言をいただいた。ここに感謝の念を表する。

参考文献

(1) 原田広史，横川忠晴，佐藤彰洋，川岸京子，谷月峰，高温学会誌，33-5，(2007)，p.237.

(2) Yoshioka, Y., Saito, D.., Fujiyama, K., Kashiwaya H., Kondo T., Ishii J., Homma T., CIMAC Congress 2001, (2001), p.249.

(3) 吉岡洋明，日本ガスタービン学会誌，32-3，(2004)，p.178.

(4) Epishin, A., Link, T., Nazmy M., Staubli M., Klingelhöffer H., Nolze G., Superalloys 2008, (2008), p.725, TMS.

(5) 小泉裕，小林敏治，横川忠晴，大沢真人,原田広史，青木祥宏，新井幹也，日本金属学会誌，68-3，(2004)，p.693.

(6) Osawa, M., Shiraishi, H., Yokokawa T., Harada H., Kobayashi T., Superalloys 2004, (2004), p.725, TMS.

(7) Koizumi, Y., Kobayashi, T., Harada, H., Yamagata, T., Advances in Turbine Materials, Design and Manufacturing, (1997), p.679.

(8) 小泉裕，中沢静夫，原田広史，日本国特許3069580.

(9) Yoshioka, Y., Okamoto H., Ishibashi K., GT2006-90748, (2006), ASME.

(10) 大沢真人，Wu, R.,原田広史，横川忠晴，日本ガスタービン学会誌，33-3，(2005)，p.191.

(11) 木村智人，鈴木崇宣，小泉裕，横川忠晴，原田広史，今井八郎，日本金属学会誌，71-11，(2007)，p.1041.

(12) 小泉裕，木村智人，横川忠晴，原田広史，第34回ガスタービン定期講演会講演論文集，(2006)，日本ガスタービン学会.

(13) 横川忠晴，小泉裕，原田広史，鈴木崇宣，青柳岳史，木村隆，日本金属学会誌，71-9，(2007)，p.693.

(14) Yokokawa, T., Saeki, H., Fukuyama, Y., Yoshida, T., Superalloys 2004, (2004), p.859, TMS.

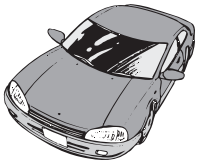
(15) 佐伯祐志，松下政裕，福山佳孝，吉田豊明，横川忠晴，原田広史，日本ガスタービン学会誌，36-4，(2008)，p.283.

(16) H. Saeki, et al., International Gas Turbine Congress, TS-122 (2003).

(17) 原田広史，横川忠晴，尾高聡子，吉田豊明，小河昭紀，野崎理，佐伯祐志，日本国特許3969518.

(18) Kitashima, T., Wang, J., Harada, H., Sakamoto, M., Yokokawa, T., Fukuda, M., IGTC07-ABS-83, (2007), GTSJ.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.



あるガスタービン・アドボケータの願い

三輪　光砂*1
MIWA Kosa

原動機を定置用と移動用に分けることは，古くから行なわれてきた。定置用は発電用を主として圧縮機，ポンプ駆動用など多岐にわたり，さらに常用，非常用に分けられる。

発電用ガスタービンは初期には急速始動の特性を生かして非常用に使われることが多かったが，性能，信頼性の向上と，排熱利用の蒸気サイクルとのコンバインド化により他機種の及ばない高い熱効率を達成し，常用の発電用として確たる地位を占めるに至っていることは周知の通りである。

しかし，上記は大出力の発電所向けガスタービンの話であり，中・小出力域では排熱を蒸気や温水として利用するコージェネレーションによっても，最近の燃料価格の高騰により休止に追い込まれたり，ディーゼルやガスエンジンに替えられるケースも少なくない。また，分散型電源として注目されたマイクロガスタービンやIPPも，同じような理由で伸び悩んでいるようである。したがって，中・小出力域では非常用を除いて大きな進展は望み得ないであろう。

移動用ガスタービンには航空用，舶用，車両用などがあるが，航空用を除くとほとんど見るべきものがない。商品として市場性のあるものがないという意味である。

舶用では艦艇用に航空転用型か，それから派生したガスタービンが広く用いられ，我が国も例外ではない。商船用はかつて熱心に研究され，十指に余る船が就航したが，燃料費の不利からほとんどがディーゼルへの換装や撤退を余儀なくされた。商船用は今や圧倒的にディーゼルの世界で，ガスタービンは水中翼船やホバークラフトを含む高速のフェリーや，大気汚染の防止や居住性を重んずる客船に僅かに用いられているに過ぎない。

車両用は自動車用と鉄道車両用に分けられるが，現在この分野で動いているガスタービンは，世界中でも戦車用など軍用を除いてほとんどゼロであろう。顧みればこの分野，特に自動車用やコージェネレーション用に1960年代から90年代末に亙ってなされた熱心な開発努力の残したものは何だったかを考えざるをえない。

ここで，最近の自動車の駆動装置をみると，ハイブリッド方式では，モーター（発電機兼用）と電池（蓄電池）をガソリンエンジンに組み合わせて燃費の低下を達成している。現在主流となっているスプリット方式では，エンジンは直接車輪の駆動に関わっているため，負荷は変化する。これに反して，最近，あるバスのメーカーは，エンジンを発電のみに使い，モーターで車輪を駆動するバスを試作中と報じられた。このシリーズ方式は，古くから試みられた方式で，そこではエンジンは常に全力運転できるのではないか，とすればガスタービンの出番があるのではないかと考える。現にトヨタが最初に試作したガスタービン車はこの方式で，1975年の東京モーターショーに試作乗用車を出品している。しかし，今世紀に入るとガスタービンを使ったハイブリッド車の計画は，原油価格の上昇と共にほとんど聞かれなくなった。海外でも同様である。

ガスタービン・ハイブリッド車の実現には，ガスタービンの熱効率をどこまで上げ得るかが鍵を握ると考えられる。参考までに，約10年前に，川崎重工業㈱はセラミックスを多用した出力300kWの試作機で42.1％の熱効率を達成している（本誌 Vol.27，No.5，pp.308～316）。研究室での値としても，ガスタービンの十分な可能性を示すものと考えられる。他に生産コストなど多くの問題があるが，競合相手のディーゼルに比べ排気の清浄度，発電機を含めた重量，容積など，優位の点も少なくないと思われる。

自動車の将来はどうなるか？電気自動車が近い将来，都市部を中心に普及することは確実であろう。しかし，水素，燃料電池車については，誰もはっきりした見通しを示していない。まだ２・30年は，バイオ燃料を加えた石油を燃やすエンジンの時代が続くと考えるのが常識と思われ，そこにガスタービンを割り込ませたいのがこの小文の趣旨である。自動車用で見通しを得れば，鉄道車両用への展開は容易であろう。ディーゼル自動車は世界中で走っており，マーケットは膨大と言える。

実務を離れて20年になり，乏しい情報と知識のなかからこの提案をする理由は，我が国のガスタービン産業がよりメジャーのものとなり，研究の活発化や当学会の会員の増加，財政基盤の確立に役立つことを願うからに他なりません。筆者の知らないところで，提案に沿った研究が進められているとすれば，嬉しい限りです。

喫茶室にふさわしくない硬い話になって恐縮です。

原稿受付　2008年11月19日

＊1　〒351-0101　埼玉県和光市白子３－35－６－104
㈳日本ガスタービン学会　名誉会員

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.112, 2025/07/10.