

## 小特集・ガスタービンにおけるモニタリング技術

## 総論

手島 清美\*<sup>1</sup>

TESHIMA Kiyomi

杉山 七契\*<sup>2</sup>

SUGIYAMA Nanahisa

高瀬 等\*<sup>3</sup>

TAKASE Hitoshi

キーワード：モニタリング，制御，計測装置，ガスタービン，成果報告書

## 1. はじめに

日本ガスタービン学会では第23期（1997年度）の理事会において「モニタリング技術調査研究委員会」を発足させた。第24期，第25期の2年間に亘って実質的な活動を行った。そして第26期（2000年度）に成果報告書の作成をおこなったのでその概要を報告する。この間に本調査研究委員会に携わったメンバーは表1の通りで、各委員はそれぞれの分野での専門家であるだけでなく、広い視野で物を見る見識のある方々である。

ガスタービンにおけるモニタリング技術とは、「性能維持のため，ガスタービンの計測情報によりシステム状況を認識し，機器保護・整備に関する情報を提供する技術」とするのが妥当である。この定義から分かるように，モニタリング技術は計測・制御・データの蓄積と処理および予防処置を含む広範なものである。また，ガスタービンといっても，用途によって航空用・陸上用，常用・非常用，発電機駆動用・機械駆動用等々がありモニタリングの内容は異なる。

本成果報告書を作成するに際して，ガスタービンに携わる人たちが，「問題に直面した時に手引き書として参考にできるもの」ということを基本方針にした。第1章ではモニタリングの定義や原理，意義と必要性，さらには歴史的な経緯，国際化の動向といった包括的な展望が述べられる。第2章ではガスタービンが利用される各分野におけるモニタリング技術の適用状況を述べた。第3章ではモニタリング技術のニーズおよび技術的な展望を述べた。ここではガスタービンを使用している各分野に対して行ったアンケート調査の結果にも言及している。第4章では各種センサに関する概要が述べられている。第5章ではデータ処理技術，データベースに関する技術が述べられている。第6章では性能劣化・寿命予測技術

に関する現状と展望を述べている。第7章では以上のまとめとして，モニタリング技術のまとめと将来展望が述べられている。本学会誌では，これらを4編に亘って紹介する。本編では第1，3章を中心に全般的な概要を紹介する。

## 2. モニタリング技術の原理，目的と効果

## (1) 原理

図1はモニタリングの原理を示している。ガスタービン中に何らかの問題が発生すると，その部位の要素特性や形状が変化し，（大小遅速はあるが）多くの変数の変化となって現れる。この変数を計測することにより，逆にどの要素でどういう問題が起こったかを合理的に推定し，問題の原因を特定することができる。その推定・特定の精度はケースバイケースで異なるが，いかなる整備を行うべきかの指針を与えることができる。

モニタリングと類似した技術として，ガスタービンの制御技術があり，「ガスタービンの計測情報によりシステム状況を認識し，制御部の操作により目的に沿う運用をさせる技術」と定義できる。「計測・認識・操作（通報）」というシステム構造の類似性から，モニタリング・システムと制御システムとは，近年極めて漸近してきており，いずれは統合される可能性が高い。

## (2) 目的

モニタリングを行う目的は種々あるが，そのどれもがガスタービン運用における，(1)経済性の維持向上，(2)信頼性の維持向上，(3)環境性の維持向上，の3点に帰着する。これらの3つの目標は互いに相反する性質をもつことがありうる。例えば，環境性を重視すれば経済性が低下し，経済性を重視すれば信頼性が低下するという状況もある。この場合，ガスタービン運用条件と運用ミッションに従って，3つの目標にプライオリティー付けがなされ，運用されることになる。従来は，経済性のプライオリティーが最も高かったが，今後は，環境性のプライオリティーが優先するケースが増えてこよう。

原稿受付 2001年1月12日

\*1 京都大学 大学院 工学研究科

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

\*2 航空宇宙技術研究所 航空エンジン研究部

\*3 関西電力(株) 火力エンジニアリングセンター

表1 モニタリング技術調査研究委員会委員

委員長	手島 清美	京都大学 大学院研究科 機械工学専攻 講師
幹事	高橋 毅	(財)電力中央研究所 横須賀研究所 プラント熱工学部 上席研究員
	* 佐藤 和憲	川崎重工業(株) 汎用ガスタービン事業部 システム品質保証部 (第24期, 第25期)
	当房 昌幸	(株)東芝 火力プラント技術部 制御担当 参事 (第25, 26期)
委員*	熱田 正房	(株)日立製作所 火力・水力事業部 火力・水力技術本部 統括グループマネージャー
委員	堀内 英一	(株)日立製作所 情報制御システム事業部 発電制御システム設計部 主任技師
委員	荒畑 実	石川島播磨重工業(株) 航空宇宙事業本部 技術開発センター 制御技術部 部長
委員	馬場 俊博	石川島播磨重工業(株) 航空宇宙事業本部 ガスタービンプラント事業部 プラント技術部担当 部長代理
委員	安藤 裕昭	三菱重工業(株) 高砂製作所 プラント技術部 主幹技師
委員	井口 和春	(株)荏原製作所 気体機械事業部 袖ヶ浦工場設計第二部 部長
委員*	岡野 幸雄	ダイハツディーゼル(株) 技術第一部 担当部長
委員	岡内 崇	ダイハツディーゼル(株) ガスタービン技術部 担当部長
委員*	北島 秀明	三井造船(株) エネルギープラント事業部 機器設計部 課長
委員	佐藤 和憲	川崎重工業(株) 汎用ガスタービン事業部 システム品質保証部
委員	杉山 七契	科学技術庁 航空宇宙技術研究所 航空エンジン研究部 エンジン制御研究室 室長
委員	高瀬 等	関西電力(株) 火力エンジニアリングセンター 課長
委員	高橋 善栄	(株)新潟鉄工所 新潟ガスタービン工場設計課 第2係 主査
委員	高原 北雄	高原総合研究所 所長
委員*	田振 晶	大阪ガス(株) 営業計画部 開発推進室
委員	古賀祥之助	大阪ガス(株) 営業技術部 TES技術チーム
委員	土屋 利明	東京電力(株) エネルギー環境研究所 エネルギーグループ グループマネージャー
委員	当房 昌幸	(株)東芝 火力プラント技術部 制御担当 参事
委員	吉岡 俊彦	日本航空(株) 整備本部エンジン事業部 技術グループ チーフマネージャー
委員	吉田 博夫	通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部 流体工学研究室 室長

\*は途中退任

調査研究協力者

貝原 正人 (株)ダイハツディーゼル 技術第1部 設計第4グループ 係長

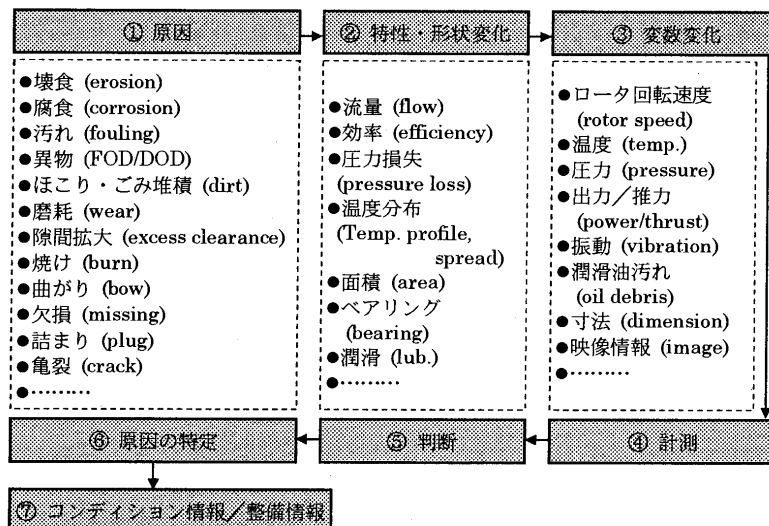


図1 モニタリングの原理

(3) 効果

ガスタービンのライフサイクルコストの大部分は燃料費であって、モニタリングによるガスタービン効率の維持は直接的に大きな経済効果をもたらす。燃料価格の上昇、CO<sub>2</sub>税（ノルウェー、税率100%）等の社会情勢では、その効果はさらに大きくなる。また、性能（効率）劣化がNO<sub>x</sub>排出量を増やすという報告もあり、ガスタービン効率の維持は環境適合性の面でも効果がある。

ガスタービンの状態（Health Condition）に関する良質の情報は、TBO（Time between Overhauls）を延長させ、莫大な費用を要する開放整備あるいは取りおろし整備の回数を減らすことが出来る。大型航空用ガスタービンの最高度の整備には100万ドルを要すると言われている。いくつかの事例では、モニタリングシステムの導入により、整備費が約30%低減したとの報告がある。さらに、ガスタービンに予期せぬ問題が発生した場合、モニタリングされた種々のデータによって問題解決がなされることも多く、この経験による知識の蓄積がモニタリングシステムの有効性をさらに向上させることになる。

モニタリングはガスタービンのアベイラビリティ（Availability）の向上に寄与し、経済効果および信頼性向上効果をもたらす。航空用はもとより産業用でも、主原動機としてのガスタービンの重要性は極めて高く、ガスタービンの予定外シャットダウン・修理の及ぼす影響は甚大であるため、的確な不具合・故障の検知（Detection）、診断（Diagnostic）、判断（Decision）を提供するモニタリングシステムの必要性は益々高まっている。

3. モニタリングシステム概念

図2は産業用ガスタービンプラントを対象としているが、航空機用の場合は、プラントを航空機、コンソール・ディスプレイをコックピットなどと読み替える。

計測器は制御、操作表示、モニタリングについて専用あるいは共用のものがある。重要な変数については2重

3重の計測器が設置される。良質な計測は、図に示す様な制御監視統合システムの成功のために最も重要なファクターであろう。間違った情報からは間違った結論しか導かれなからである。

遠隔地との通信機能は、熟練した専門家をプラントサイトに配置したのに等しく、モニタリングシステムではカバーしきれない高度な技術判断を、最小のタイムラグで下すことができ、また、専門家人件費の低減にも寄与する。インターネットをはじめとして通信機能は国際的に充実してきており、遠隔モニタリングは実現しつつある。

次に、Shahroudiのシステムをベースにしてモニタリングシステムの内部構成（図3）について述べる。図において、垂直方向の各層（Layer）はデータ要約（Data Abstraction）のレベルであり、上にいくほど高度に解釈された情報を提供する。また、水平方向は各データ要

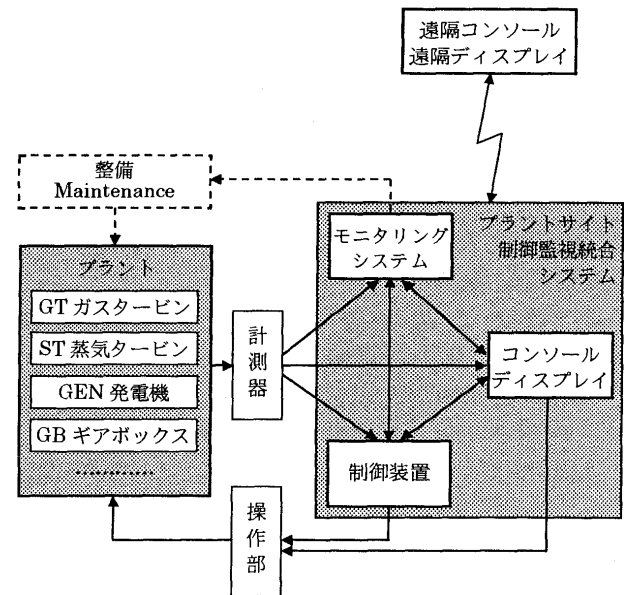


図2 モニタリングシステム概念

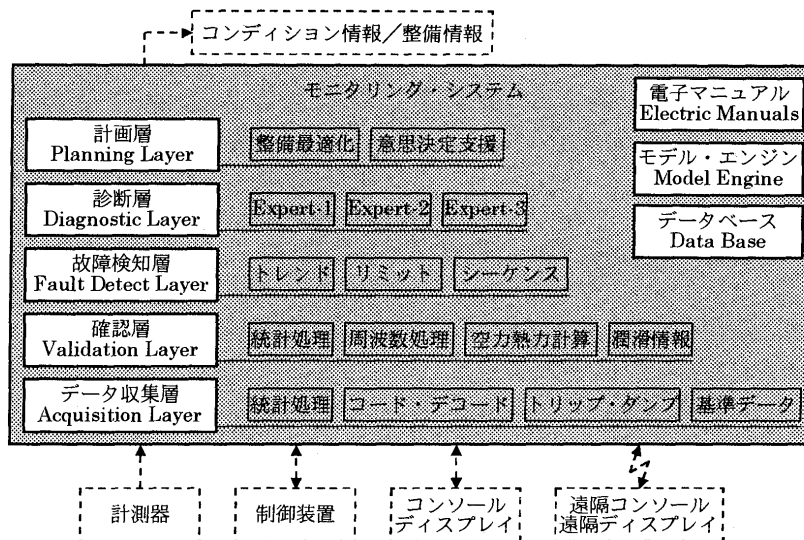


図3 モニタリングシステムの内部構成

約レベルにおける種々の機能ユニット (Functionality) を示している。データ要約の各層は、下位の層よりデータを受取り、機能ユニットを使用して、高度な情報として上の層へ送り込む役割を担っており、トータルとしてガスタービン作動状態情報や整備情報等のモニタリング情報を発生する。

以下に各データ要約層について説明する。

- (1) データ収集層 (Acquisition Layer) 計測器からの生データ、制御装置からの制御中間変数等の情報、コンソールからの操作情報を収集する。特殊計測のハードウェアを含む場合もある。不良データを除去する。
- (2) 確認層 (Validation Layer) データ収集層からのデータに基づき、重要なパラメータを導出する。例えば、空力熱力計算ユニットでは、空気流量、パワー、コンプレッサ効率、各種修正変数等を得る。導出されたパラメータ間に矛盾がある場合、センサ故障が調査される。
- (3) 故障検知層 (Fault Detect Layer) 確認層からの重要パラメータのトレンド (長期的変化の特徴)、リミット (許容制限値)、シーケンス (状態変化の合理的解釈、例えば、出力セットポイントの変化に対して、制御弁変位、各部温度、ロータ回転速度の変化が熱力的空力的に妥当であるかとの解釈) が調査され、故障を検知する。
- (4) 診断層 (Diagnostic Layer) いわゆる人工知能 (Expert, Neural Net, Fuzzy 等) ユニットにより、故障の原因を追求する。プラントが複雑化し、熟練専門家が不足している現状では極めて重要な技術となってきたが、成熟した技術にはなっていない。
- (5) 計画層 (Planning Layer) 問題修復のための最適整備計画を策定する。スペアパーツ、整備員の手配を行い、ダウンタイムの最小化を図る。

これまでに開発され使用されてきた多くのモニタリングシステム、また本調査報告書で紹介されるモニタリングシステムおよびその周辺技術は、上記の概念システムの一部をなしている。その大半は、下位3層 (データ収集層、確認層、故障検知層) に関するもので、診断層・計画層は専門家の判断に依存しているのが実情である。

#### 4. 国際規格化の動向

国内での最近の各種機械設備は、機械の性能向上面ではほぼ飽和状態にあり、設備の運用背景も、機械の更新は寿命時に、使用期間は寿命一杯への考え方が進み、この手段として、監視装置や診断技術を上手に使う考え方が進められつつある。一方、欧州連合を中心とした最近のISOでの動きの中で、機械設備の維持、品質確保等の質的向上は欠かせないと考えから、監視・診断装置の規格化が、現在、進められている。我が国としてもこれらの動向から目を離すわけにはいかない。

そこで、ISOでの規格化の実態と現状を、将来の国際的な監視・診断技術に対する動向も含め、入手したデータを中心に監視・診断技術の動向を紹介した。

#### 5. アンケートによるモニタリング技術へのニーズ

##### (1) アンケートの目的

現在、ガスタービンは広い分野で使用されているが、良好な運転状態を維持・管理してゆく上で欠くことのないモニタリング技術 (計測、データ処理、評価を含む) は極めて重要な役割を担っている。このような背景から、モニタリング技術の現状を調査するとともに、ガスタービンの正常な運転の維持に欠かせない状態監視、性能監視、あるいはそのために使用しているデータ処理システムや、部品の劣化や寿命予測のための評価システムなど現状の実態を把握すると共に、今後、開発が望まれるセンサやデータ処理システムの動向調査を行った。

##### (2) アンケート結果要約

###### 1) センサ技術

ガスタービン設備の「センサ技術の現状」および「今後開発が望まれる要素技術」を調査し、現状での主要な問題点と改善要望等を把握した。なお、調査は各種資料調査、アンケート調査等によって実施し、現状のガスタービン設備における適用センサの実態や改善要望、将来必要になると考えられるセンサ技術と機能を整理した。

結果の1例として、表2に「今後開発が望まれるガスタービン計測項目と必要とする要素技術」を示す。

ガスタービン設備におけるセンサ技術の高度化で重要なことは、高温の厳しい環境条件の中で長期にわたって正確に状態量を計測することである。したがって、センサを実機に適用するには、何の為に測るのか、どのような手段で測るのか、設置環境条件に耐えられるのか、性能 (感度、検出限界、応答速度、精度、安定性) 的に問題ないか、ライフサイクルコスト (初期投資コスト、メンテナンスコスト、取替コスト、製品寿命) は妥当であるかを事前に充分検討・評価したうえで、最適なセンサを選ぶことが重要である。

###### 2) データ処理応用技術

ガスタービン設備の「データ処理応用技術の現状」および「今後開発が望まれるデータ処理技術」を調査し、現状システムならびに今後開発が望まれるシステムそれぞれについての技術的課題を把握した。なお、調査は各種資料調査、アンケート調査等によって実施し、現状の課題と今後開発システムの課題を整理した。

近年パーソナルコンピュータとネットワークを使った「ガスタービン設備メンテナンス管理システム」が導入されている。これは故障による損失と保全に要する費用との適切なバランスの上に立った設備保全を行うため、ガスタービン設備の保守点検管理から故障管理も含めたシステムである。設備保全には、事後保全、時間基準保全、状態基準保全があるが、これまでガスタービン設備

表2 今後開発が望まれるガスタービン計測項目と必要とする要素技術

計測項目	計測方法	計測目的	概要説明	必要とする要素技術
GT 排ガス分析	燃焼器出口ガス分析	燃焼状態の把握	排ガスの元素分析を行うことにより、各燃焼器の最適燃焼状態を確認する。	連続での燃焼器出口ガス分析
GT 高温部品表面温度 (応力)	表面温度計測 (光温度計等)	高温部品の寿命管理 (燃焼器部品)	ガスタービンの高温部品は、起動停止による低サイクル疲労と、連続運転による高温酸化で寿命消費するが、表面温度を計測することにより、応力と酸化減肉量を把握する。	連続での表面温度計測技術 (光温度計等)
GT 燃焼器の空燃比	燃焼器毎の空気流量および燃料流量	燃焼状態の把握	個別燃焼器毎の燃料量と空気流量を測定することにより、最適燃焼状態を把握する。	燃焼器への空気流量および燃料流量の測定技術
GT 燃焼器出口温度	サーモカップル等	燃焼温度の直接監視	現在の燃焼器監視は燃焼器の状態を排ガス温度により間接的に推測している。ダイレクト計測が出来れば非常に効果的である。	耐高温、耐振動、長寿命のセンシング技術の開発
GT 出力	トルク等	一軸C/CでのGT出力の計測	現在は、軸出力からST蒸気圧力等で演算したST出力を差し引き、GT相当出力を計算している。	

の保全は、どちらかと言うと時間基準主体で保全を実施してきた。しかし最近、設備の傾向監視データを解析することで突発事故の防止や分解点検周期の延長を視野に入れたデータ処理システムの必要性が高まってきている。

## 6. おわりに

本成果報告書は、“まえがき”で述べた編集方針の下に、各担当委員が執筆したものである。この調査を通じて強く感じたことは、メーカ、ユーザともにモニタリング技術に対する関心が高く、各分野において多大の努力が傾注されているということである。このような現状を

目の当たりにして、モニタリング技術は今後さらに着実に発展してゆく、との確信を強く持った。

おわりに、本調査研究委員会を発意し、活動の期間中を通して好意的な支援を頂いた日本ガスタービン学会理事会に敬意と感謝の意を表します。事務作業に適切な指示と協力を頂いた事務局に感謝します。また、各委員の所属する組織には、調査活動の承認、資料や情報の提供、委員会会場の提供などを通じて、大変な理解を得た。さらに、見学やアンケート調査に応じて頂いた方々のご協力を頂いた。併せてここに記してお礼とさせていただきます。

小特集・ガスタービンにおけるモニタリング技術

## 現状のモニタリング技術の適用状況

井口 和春\*<sup>1</sup>  
IGUCHI Kazuharu

当房 昌幸\*<sup>2</sup>  
TOBO Masayuki

吉岡 俊彦\*<sup>3</sup>  
YOSHIOKA Toshihiko

キーワード：モニタリング，ボアスコープ，潤滑油，ウェーブレット，ガスエキスパンダ

### 1. はじめに

モニタリングの概念は広範で多様な技術要素の混在する、ある種のあいまいさと実体の定義付けが難しい側面を有している。しかし、その役割・目的としては、設備機器の異常の検知、異常兆候の予知、性能管理といったキーワードに集約されることは、ほぼ異論のないところと思われる。

以下は、航空用ガスタービン、大型発電用ガスタービン、特殊用途ガスタービンの分野から、特徴的なモニタリング技術の適用状況を紹介する。

### 2. 航空用ガスタービン

#### 2.1 エクシーダンス・モニタリング (Exceedance Monitoring)

日本航空、ルフトハンザ航空、オランダ航空、スカンジナビア航空等では1970年代後半から、コンピュータによる機上での異常のモニタリングと記録を行うシステムの開発に力を入れており、1985年前後より実用化している。

モニターする異常事象は、制限値の超過という意味でエクシーダンス (Exceedance) と呼ばれている。飛行中にある異常が発生した場合は、あらかじめ定められたロジックに従って、磁気テープへの連続記録、瞬間データのレポート作成、時系列データのレポート作成、空地通信を用いた地上への通知等が行われる。

#### 2.2 ボアスコープによる検査

内視鏡 (ボアスコープ) を使用して、エンジンの内部を目視で検査する手法である。この手法は、初期のガスタービンエンジンのころから使用されているが、技術の進歩とともに、検査の精度は著しく改善している。最近では高性能の CCD カメラを使用したものが主流となっ

ており、画面で状況を確認できるようになっている。

現在、機体の定例整備時にボアスコープによる検査を実施している部位は、主としてタービン第1段ノズルガイドベーン、第1段及び第2段タービンブレードおよび燃焼室であるが、機種により多少異なる。検査の間隔も機種により異なるが、飛行時間が、大体1000時間から2000時間、飛行回数にして250から600飛行回数毎に実施している。

#### 2.3 潤滑油分光分析プログラム

ベアリング、シール、ギア等エンジン内部の潤滑された部分に異常が発生すると、磨耗した金属片が潤滑油中に混入する。従って、潤滑油を定期的に採取し、分光分析して、含まれる金属成分を調べ、その変化をモニターすることにより、それらの部品の異常を早期に発見することが可能となる。

一般的にこの手法は SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program) と呼ばれ、1970年頃から航空会社に導入されはじめ、日常のエンジンモニタリングに活用されている。

この手法を使ったモニタリングには種々の方法があるが、潤滑油の中の金属成分の濃度と消費した潤滑油の量から、各成分毎に累積の摩耗量を算出し、グラフ出力して、摩耗の状況をモニターする方法が一般的である。日本航空では本プログラムを全ての機種に適用し、一部の機種を除いて200時間毎に潤滑油を採取して分析を行っている。日本航空の1年間のエンジン使用時間が約160万時間であることを考慮すると、年間約8000回もの検査を実施していることになるが、年間数件の不適合がこのモニタリングにより未然に発見されていることを考慮すると、十分コストに見合った手法であると考えられる。ただし、機種によってはベアリング、シール、ギア等潤滑された部の信頼性が非常に高いものもあり、これらについては潤滑油採取間隔の見直しや本プログラムの適用の廃止も検討している。

図1に不適合の検出事例を示す。この事例の場合 Mg, Fe の増加傾向は通常見られる程度であるのに比べ、Al

原稿受付 2001年1月12日

\*1 ㈱荏原製作所 気体機械事業部

\*2 ㈱東芝 火力プラント技術部

〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央4-36-5

\*3 日本航空㈱ 整備本部エンジン事業部

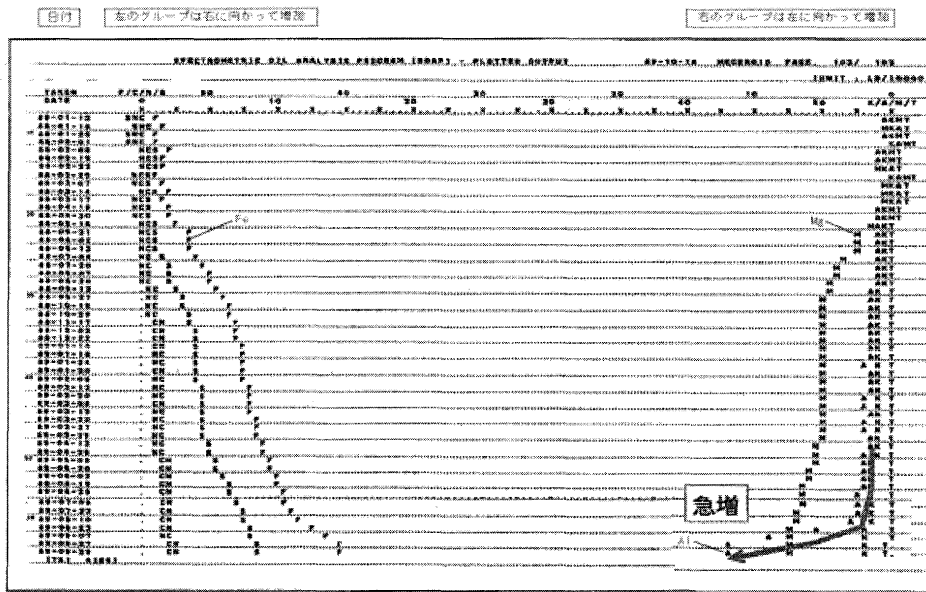


図1 潤滑油分光分析プログラムの出力例

の増加が通常と比べて異常に大きいことから不適合が疑われた。当該エンジンを取りおろして分解検査を行った結果、ギアボックス内の潤滑油分離装置のアルミ製スプラインに異常な摩耗が発見された。

#### 2.4 主パラメータのトレンドモニタリング

エンジンの主パラメータの変化をモニターすることにより異常の発生を早期に感知することができる。このために、巡航中の安定した状態における機速、外気の圧力、温度およびエンジンの回転数、出力、各部の圧力、温度、燃料流量等のパラメータを測定し、基準となる状態に修正して、その変化の傾向をモニターする手法をとっており、エンジンコンディションモニタリングと呼んでいる。

対象とする基本パラメータは、回転数（低圧軸、高圧軸）、排気ガス（温度、温度マージン：最も厳しい運転

状態における排気ガス温度の制限値に対する余裕）および燃料流量である。計算および修正されたこれらのパラメータは統計処理が行われた後、セミグラフィカル書式で出力される。

この手法ではいかに安定したデータを採取するかが重要であるが、初期の頃は、巡航中に乗務員が安定していると判断した時にデータを採取していたため、十分なデータの品質が得られなかった。現在では、機上のコンピュータに安定状態（Engine Stable Condition）を判定するロジックを組み込んで、採取させている。この手法においても、データの処理を行うのは地上のコンピュータである。

図2に主パラメータのトレンドモニタリングの出力例を示す。

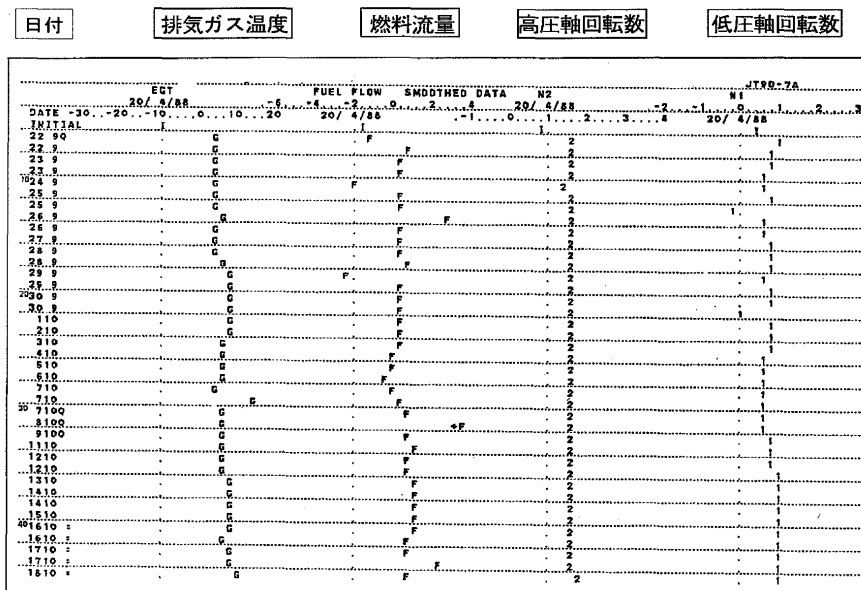


図2 主パラメータのトレンドモニタリング出力例

### 3. 大型発電用ガスタービン

#### 3.1 コンバインドサイクル発電所の監視制御システム

事業用火力発電に導入される大型発電用ガスタービンは、効率面と対環境性よりコンバインドサイクルで構成される事例がほとんどであり、最近では1500℃級の大型ガスタービンの導入も開始され最先端の高温化技術を駆使して、タービン入口温度の上昇を図り、更なる高効率を達成している。コンバインドサイクル発電プラントのモニタリング技術は広範な技術分野を包含するが、最新鋭のプロセス計算機やマイクロプロセッサを搭載した制御装置等を主体に構成された監視制御システムに依存する要素が大きい。

近年発電プラントにおいて運転員の少人数化が指向されているが、コンバインドサイクル発電プラントにおいて管理される情報（プロセス値、パラメータ信号等）は膨大であり、入力点数に換算して約2万点から3万点となり通常の火力発電所の数倍にも及ぶ場合がある<sup>(1)</sup>。このような動向のなかで、ACCプラント(Advanced Com-

bined Cycle Plant) に適用された監視制御システムの構成事例を図3に示す。コンバインドサイクルプラントの監視制御システムは、系列、軸といったプラント設備自身の階層構成に対応した機能分散階層構成が特徴であり、特にモニタリング技術の一環として、運転員と監視制御システムの接点となるマン・マシン・インターフェース部に関しては系列制御盤に配置されたCRT装置、情報の共有化を目的とした大型スクリーン、音声通報装置など視聴覚を利用した総合的なヒューマン・インタフェースを指向し、この情報量のいわば洪水状態の中で、データをいかにわかりやすく提供するか、必要とする情報にいかに迅速にアクセスするか、得られた情報をいかに有効活用するか等の視点で構築されたものである。

#### 3.2 マン・マシン・インターフェース

設備の異常兆候検知を目的としたヒューマン・モニタリングはマン・マシン・インターフェース部を通じて行なわれる。ガスタービンの軸受振動を例にとったCRT画面表示を図4に示す。ガスタービンの監視対象として

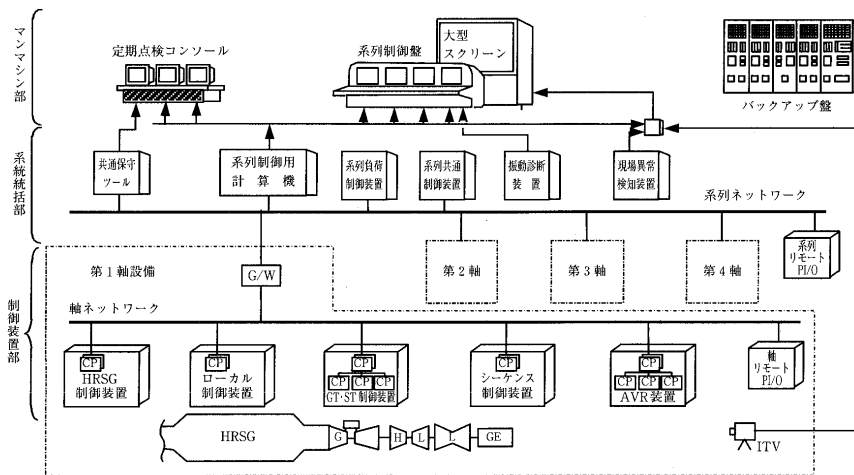


図3 ACCプラントの監視制御システム構成例

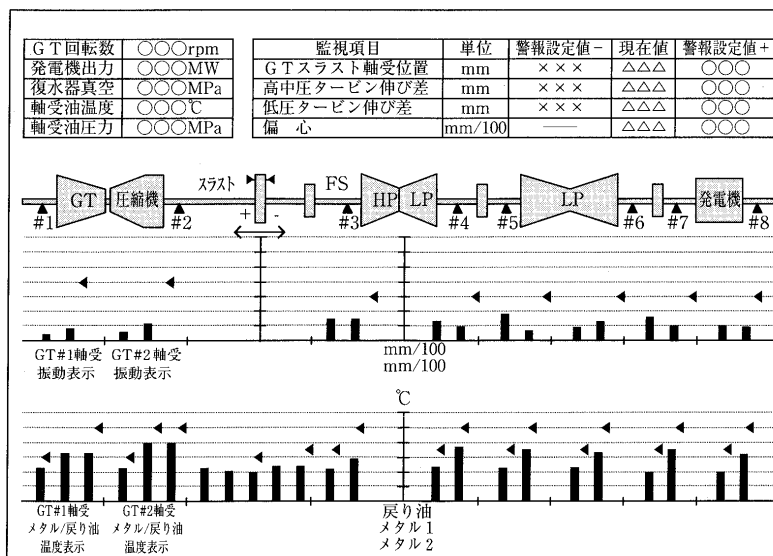


図4 軸受振動モニタリングのCRT画面



重要な軸受振動は、視覚的にわかりやすいバーチャート(棒グラフ)によるグラフィック・ディスプレイ化されてCRT画面に表示され、運転員はリアルタイムで軸受振動値をモニタリングする。このバーチャート上には警報値には指標(矢印)が付され、軸受振動値が警報に達したときは、当該のバーチャートが色替り表示すると共に警報メッセージがチャイム鳴動を伴ってフリッカ(点滅)表示される。軸受振動のモニタリング時は軸受の状態に関連する軸受メタル温度と潤滑油戻り油温度も一括して監視することが有効であることから、これらのプロセス値も振動値と並行してバーチャート化表示される。またガスタービンと蒸気タービン・発電機間の相互作用の振動も想定されることから蒸気タービン・発電機の軸受振動値や、その他振動に影響するタービン回転数やスラスト軸受等の付帯情報も有機的に網羅されてグラフィック画面上に提供され、回転体としてのガスタービン監視はこのグラフィック画面一枚でほぼ充足する様に構成されている。さらにはこのグラフィック画面を大型スクリーン上に拡大表示することで、CRT画面に至近の運転員のみならず、中央操作室全体での情報の共有化が容易となり、トータルでの監視性向上が図られる。

### 3.3 高温部品の寿命管理システム

高温部品の寿命は、負荷条件すなわち設備の運用条件と材料強度によって決まる。実際の各機器の余寿命を予測して設備の予防保全を行えば、適正な補修間隔、定検

間隔の合理化や運用費の削減を図ることができる。

高温部品の余寿命評価には、き裂などの損傷の成長と長時間使用による材料劣化を評価する必要がある。このために、解析的、破壊・非破壊的、傾向管理寿命評価により、総合的な高温部品の状態診断を行うことができる。また、信頼性確保とともに運用費の削減や部品の長寿命化が図られ、合理的な予防保全計画が提案できる。この場合、定期的な検査を実施することにより機器の健全性を確認し、運転の継続可否などを判断し、同時に、運転中の状態監視(軸振動監視や音響監視)により機器の異常の有無を診断することを並行して進めることにより、さらにタイミングの良い保全が可能となる。三菱重工では、「HotMan」と名づけられた高温部品寿命管理システムを開発し、高温部品一品毎にその運転実績や点検・補修記録を一元的にデータベース化し、等価運転時間を評価し、取替、廃却の判断ができるものとしている。

### 3.4 遠隔モニタリングシステム

海外発電所でのガスタービンをメーカーが監視する補修サービスとして、インターネット経由で遠隔監視するシステムの稼動開始され、その事例を紹介する。

中央操作室でのCRT監視とほぼ同様な監視を24時間実施している。ガスタービンの異常を早期に検出することによって、メーカー技術者の知見を活用した予防保全を可能としている。図5に遠隔監視システムの構成とその操作状況を示す。

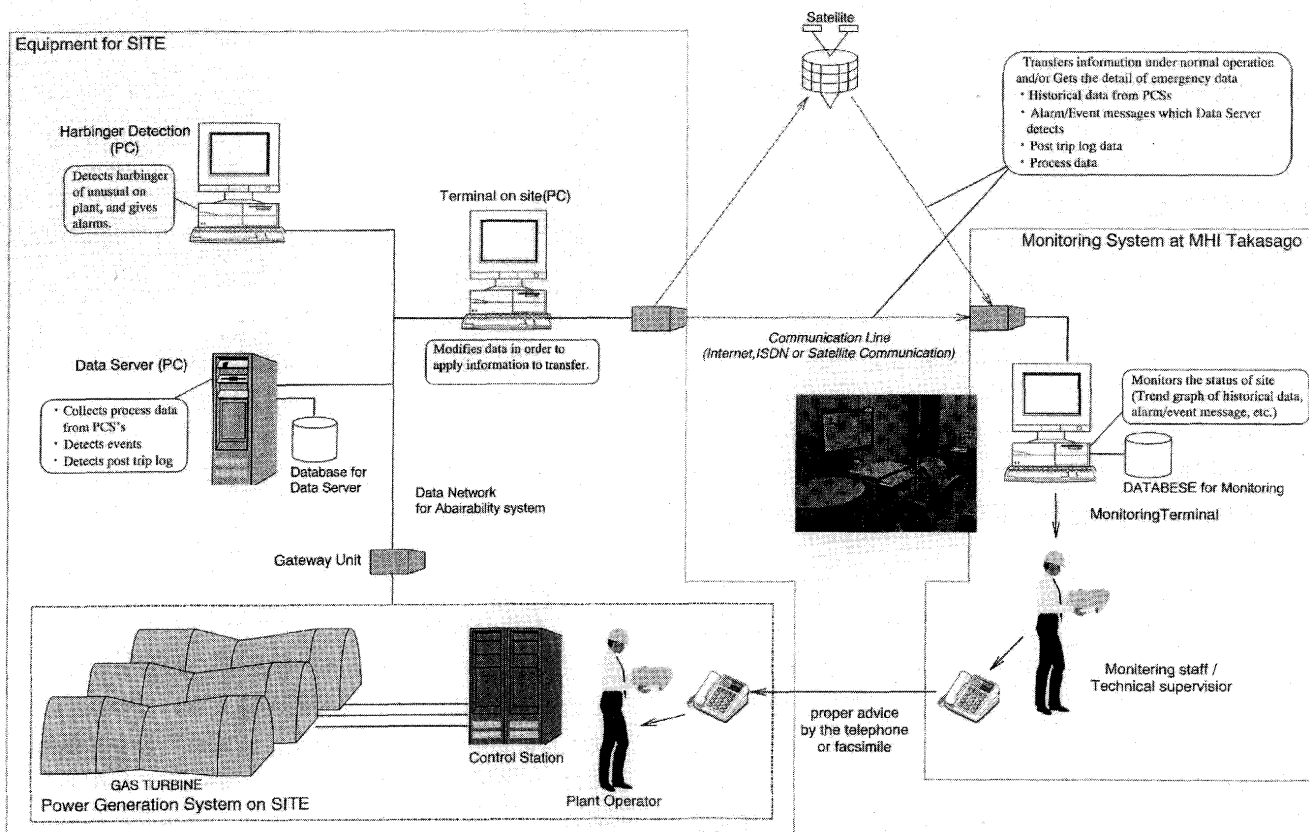
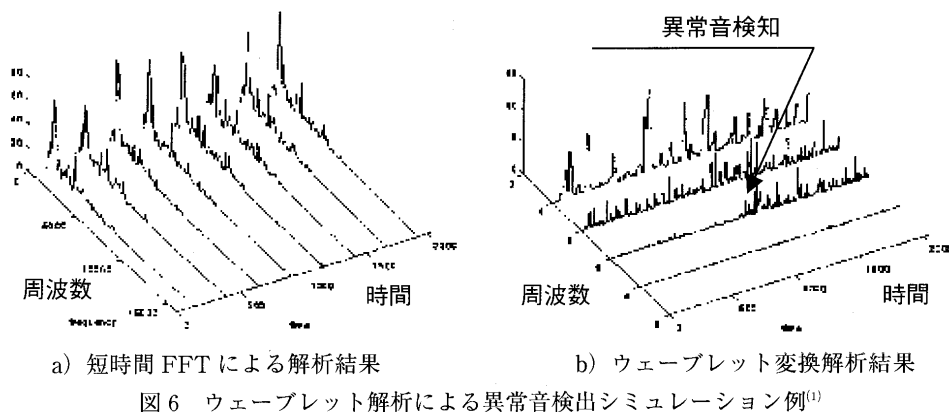


図5 遠隔監視システムの構成とその操作状況



### 3.5 ウェーブレット解析による異常診断

図6は中井らが行ったウェーブレット解析を用いた異常診断検出の事例である<sup>(2)(3)</sup>。

実機ガスタービン通常運転時の吸込プレナムと燃焼器横で観測した音響信号に過去に発電機部品のゆるみが原因で発生した異常振動音を重畳させ、模擬異常音とし、この模擬音にFFT解析、ならびにウェーブレット解析を実施し比較したものである。異常音は、時刻1000から重畳させているが、FFTではほとんど認識できないのに対し、ウェーブレットでは明確に異常発生が確認されている。

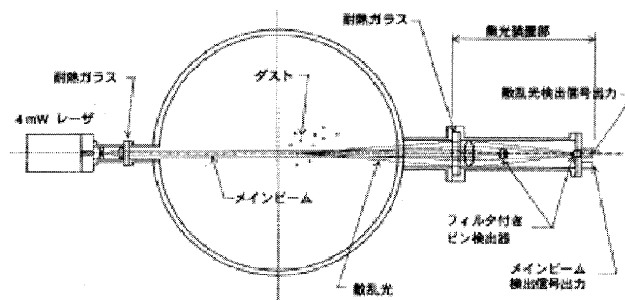


図7 ダストセンサの概念図

## 4. 特殊用途ガスタービン

### 4.1 FCC ガスエキスパンダについて

ガスエキスパンダへ供給される燃焼ガスには、ガソリン精製設備であるFCC (Fluid Catalytic Cracking—流動接触分解) 装置の触媒再生塔から発生する高温のプロセスガスが用いられる。燃焼ガスはシリカとアルミナを主成分とする硬質な触媒がダストとして含まれており、従来は摩耗問題のためにタービンの動力源として利用することが出来ず、減圧して排熱ボイラから排出されていた。しかし、耐摩耗材の開発や翼の設計技術によりガスエキスパンダが1963年に開発されて装置に設置されるようになり、大きな動力回収が可能となった。

FCC装置では、アフターバーニングと呼ばれる異常燃焼を生じ、ガスに多量のダストを流出してガスエキスパンダの動翼を一気に摩耗させる危険性がある。このため、ダスト量と粒径分布の変化を監視することが重要である。

### 4.2 ダストの監視

図7の概念図に示されるような、He-Ne レーザを利用したリアル・タイムのダスト監視装置が開発され、実際のFCCプラントで使用された実績がある。排ガス配管を挟んで水平中心線上の片側にレーザ発信器を、その反対側に集光装置を設置したダストセンサで、レーザからのメインビームがダスト粒子により乱された散乱光と、ダストの影響を受けなかった通過光の比からダスト濃度を算出するものである。

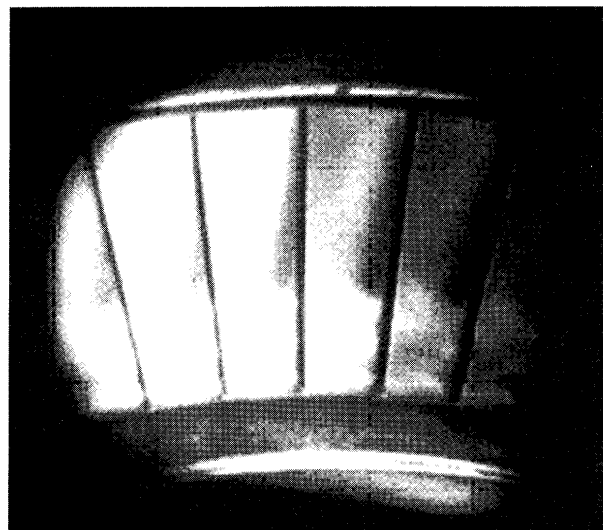


図8 FCC ガスエキスパンダの動翼撮影

実際の運転では、ダスト濃度の絶対量を正確に測定するまでには到らなかったが、プロセスのアフターバーニングによる多量のダスト流入を的確に捉えること出来た。

### 4.3 動翼の監視

FCCエキスパンダには、運転中に動翼を背面から写真撮影を可能にする監視装置が備えられている。この動翼撮影装置は、焦点が動翼上に結ばれるように排気ケースに2つの監視用覗き窓 (ビューポート) を配置し、一方にはストロボを取り付けて動翼が静止して見えるように発光間隔を調節し、他方に設置した写真機で動翼の摩耗状態を撮影する。図8にこの装置で撮影された動翼を

示す。

## 5. まとめ

ガスタービンのモニタリングは、広範で多様な技術を包含するが、その中で航空用、大型発電用、特殊用途用ガスタービンに特徴的なモニタリングをトピックス的に取り上げ紹介した。

## 参考文献

- (1) 福田, 菊池, 持地「コンバインドサイクル発電所の高度監視制御システム」東芝レビュー Vol. 49, No. 5 (1994)
- (2) 中井, 中本, 宮部, 松本「ウェーブレット変換を利用したガスタービン異常診断アルゴリズムの開発」第23回ガスタービン定期講演会講演論文集, 日本機械学会/日本ガスタービン学会共催 (1995)
- (3) 松本「誰でもわかるウェーブレット」日本機械学会, 講演会「データ処理の実際」教材 (1998)

## 小特集・ガスタービンにおけるモニタリング技術

## センサ技術

吉田 博夫\*1

YOSHIDA Hiro

キーワード：温度センサ，圧力センサ，高温環境，小型化，振動計測

## 1. はじめに

ガスタービンシステムの運転状況を安全かつ良好に保つためにはシステムに出入りする作動流体の状態やシステムを構成する各部の状況を種々のセンサを使用して把握しなければならない。図1に航空機用ジェットエンジンを例に，代表的な各種センサ取り付け位置とその検出対象を示す。

ガスタービンで使用されるセンサにおいて特に考慮されねばならない点は，1) 測定環境が多くの場合高温であること，2) 取り付け空間が狭いこと，3) 絶えず様々な振動を受け雰囲気は清浄でないことが多いこと，などであろう。加えてコストや寿命についても満足のものではなくてはならない。また，空間的制約や過酷な物理的環境のもとで得られた重要な情報を，ノイズの少ない形で伝送する方法についてもあわせて留意する必要がある。

本項ではガスタービンにおいて使用されてきた代表的センサについて概観する。また，第24，25期調査研究

委員会で行ったアンケートに基づき現状での問題点ならびに将来の課題について述べる。アンケート結果を含め各種センサの作動原理など詳細については報告書<sup>(1)</sup>を参照されたい。

## 2. センサ技術の現状

センサの良否はシステム全体の性能を左右するといっても過言ではない。本節では，ガスタービンに関連が深い温度センサ，圧力センサおよび振動センサなどを中心に概略を説明する。

## 2.1 温度センサ

温度センサには測定対象に直接接触して測定する接触型と対象からのふく射を利用する非接触型とがある<sup>(2)</sup>。ガスタービンでは温度範囲が比較的高いことから熱電対を使用することが多いが，本節では代表的な温度センサである抵抗体温度センサ，放射温度計について構造ならびに特性を概説する。

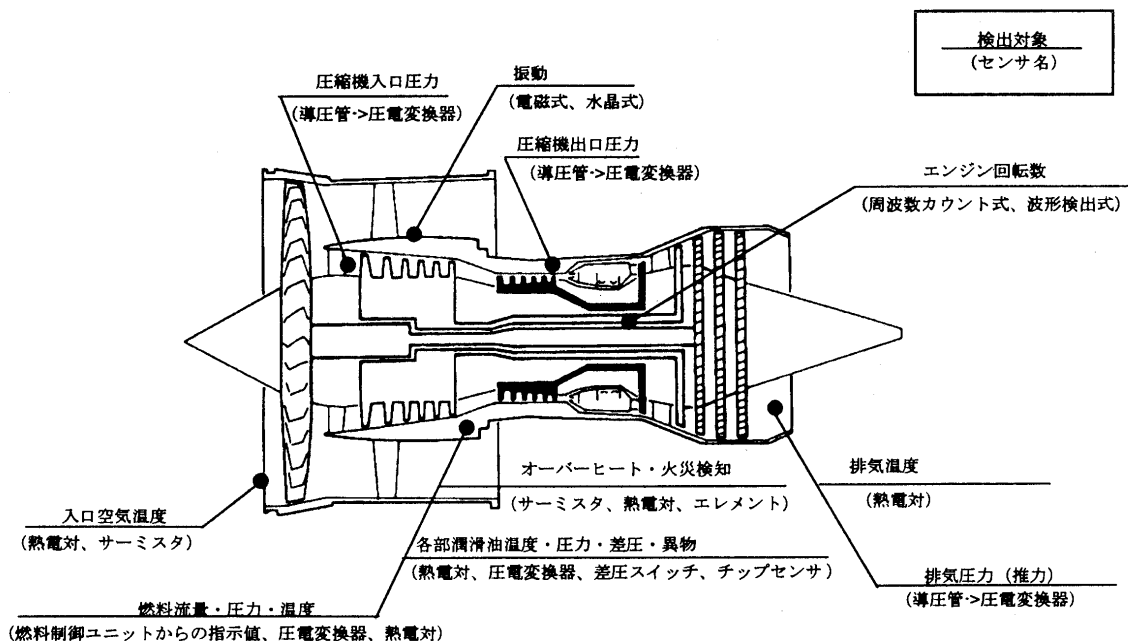


図1 航空機エンジンにおけるセンサ配置例

原稿受付 2001年1月12日

\*1 経済産業省 産業技術総合研究所  
〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2

### 2.1.1 熱電対

1,000℃を超える高温までの広い温度範囲で使用できる温度センサは少ない。構造が簡単で取り扱いの容易な熱電対はガスタービンのみならず工業的に最も多く使用されている。熱電対は、2種の金属線の両端を接合して閉ループを構成しその両端を異なる温度に保つ時に起電力が発生して電流が流れること（ゼーベック効果<sup>(1)</sup>）を利用する。熱電対の寿命は保護管の適否に左右され、工業用では耐圧力・耐熱・耐食と保守の容易さなどのために、MgOの管に入れてから保護管に入れる構造が一般的である（図2）。

### 2.1.2 抵抗温度センサ

本センサは物質の電気抵抗が温度によって変化する性質を利用したものである。金属を利用した測温抵抗体と、半導体を利用したサーミスタ測温体とに分類され、熱電対とならんで工業的に広く使用されている。金属測温抵抗体としては白金が最も多く使用される。この測温抵抗体も、熱電対と同じように保護管に入れて使用される。工業分野での温度計測用としては主として0℃での抵抗値が100Ωのものが使用され抵抗値・測温許容差はJISに定められている。センサ抵抗値と温度とは厳密には直線関係にないため直線補正用の回路が必要である。白金測温抵抗体は他のセンサに比べて安定度が高い。

サーミスタ測温体はセラミック温度センサの代表的なものである。半導体の性質を持つMnO、CoO、NiOなどの遷移金属酸化物の焼結体を使用される。センサ部を小さくできることからトランジスタ回路の温度補償、温度測定などに多く使用されている。温度に対する抵抗値の変化は直線的ではないが大きい。測定温度の許容差は±0.3℃と精度はよい反面、測定温度範囲は約150℃と比較的狭い。

### 2.1.3 熱放射温度センサ

本温度センサは非接触で測定できることが最大の利点であり、応答性に優れ、測定対象が運動状態にあっても

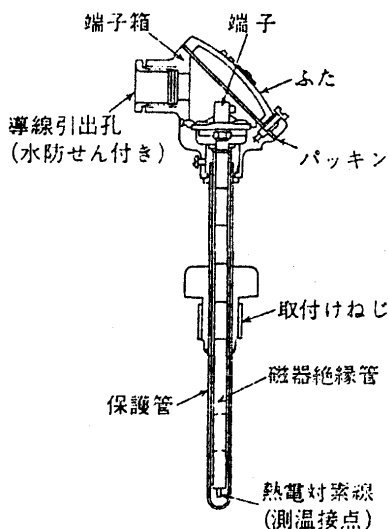


図2 一般工業用熱電対の構造<sup>(3)</sup>

計測が可能という特徴を有する。しかしながら、測定対象面の放射率や反射・吸収特性に大きく左右されやすく、現状では表面の温度しか測定できない。また、測定精度は必ずしも高くない。代表的なものとして、光温度計、シリコン放射温度計、PbS放射温度計などがある。

### 2.2 圧力センサ

従来工業的に使用されてきた代表的センサとしてブルドン管形、ベローズ形あるいはダイヤフラム形センサなどがあるがその構造などについては割愛する（文献(4)参照）。

半導体圧力センサは、信頼性が高く量産しやすいことから近年飛躍的に利用されるようになった。シリコンのピエゾ抵抗効果を利用した代表的な半導体圧力センサの構造を図3に示す。半導体結晶の加工技術ならびに板厚の精密制御技術の進歩と集積回路技術の利用によりダイヤフラム自体をSi結晶で作り、それに抵抗層となる歪ゲージを拡散法で配列している。抵抗層の歪感度はSi結晶の不純物濃度によって変わるが、ダイヤフラム形センサでは抵抗を変化させることの出来る限界は、破壊に対する安全度と圧力による抵抗変化の非線形化の度合いにより制約される。従って、ダイヤフラムの厚さを任意に選ぶことにより圧力レンジの異なるセンサを製作することができる。半導体圧力センサの最大の欠点は特性の温度依存性が大きいことである。温度依存性には零点変動と圧力感度の変動とがあるが、圧力感度の温度依存性のほうが顕著であるので実用に際しては効果的な温度補償が不可欠である。

ガスタービンシステムの制御ならびに監視用圧力計としてダイヤフラム形やベローズ形が多用されてきた。これらは材質の進歩や構造の改善ならびに電子回路との組み合わせにより安定性、保全性、精度などが飛躍的に向上している。

### 2.3 振動センサ

最も一般的な振動センサは圧電型であり、動電型がこれに続く。また、渦電流式の非接触センサも実用化されている。

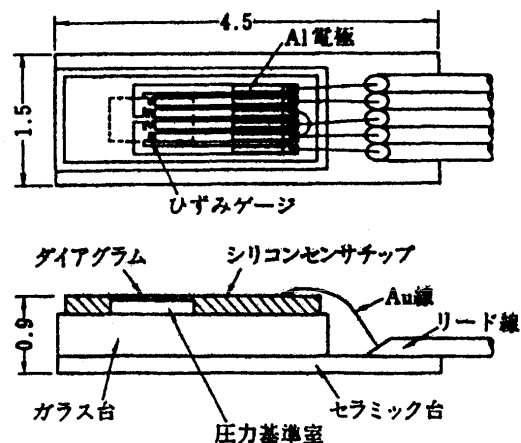


図3 半導体圧力センサの構造<sup>(2)</sup>

### 2.3.1 圧電型センサ（加速度ピックアップ）

本センサは加速度に比例した信号を出力するので加速度ピックアップとも言われる。水晶やロッシェル塩などの結晶に外力を加えるとそれに比例した電荷が生じる。この現象を圧電現象といい、これらの結晶を圧電素子という。チタン酸ジルコニウム鉛磁器は最も代表的な圧電素子でその圧電効果は最も安定かつ強力である。工業用としてはチャージアンプ内蔵の2線式のもの一般的で、定電流電源使用のもとに電圧出力を得ることができる。本センサの出力を1回積分すれば速度の、2回積分すれば変位の信号が得られるが、1回積分するごとに感度はかなり低下する。

### 2.3.2 動電型センサ（速度ピックアップ）

磁界中の導体が磁束に鎖交するように運動すると、その運動速度に比例した起電力が生ずる。この原理を利用したものが動電型速度ピックアップである。前述の圧電型センサの場合、振幅を得るためには出力を2回積分しなければならない。このため感度が低下し微小振幅の測定が困難となる。一方、動電型センサでは速度に比例した出力が得られるのでこの出力を1回積分することにより変位を測定できる。

### 2.3.3 渦電流型センサ（変位ピックアップ）

センサコイルに数MHzの高周波電流を供給するとコイルから高周波磁束が発生し近接する金属表面に渦電流が生ずる。この渦電流の大きさは最終的にコイルと金属との距離に比例する直流電圧として出力させることができる。応答周波数がDC~10kHzと広くタービン・コンプレッサなどに対して多く使用される。

振動測定には回転機械に振動センサを取り付けてオンラインで連続測定する方法と、ポータブル振動計などによりオフラインで定期的に測定する方法とがある。前述したように積分する毎に感度が低下するので、振動の加速度、速度、変位のうちどれに着目するかによってセンサを使い分ける必要がある。

回転軸の振動が軸受やケーシングにあまり伝わらない場合には渦電流型変位センサによる軸振動の測定が有効である。逆に、伝わりやすい場合には動電型あるいは圧電型センサによる測定が有効である。

ガスタービンシステムの制御や監視に使用される振動センサは、通常タービンや発電機の軸受部に取り付けられ、軸受あるいは軸の振動を検出する。軸受の振動センサとしては速度型センサや加速度型センサが用いられる。

一方、回転部の異常の兆候を敏感に検出できるとの理由から渦電流型非接触変位計を用いて軸振動を直接測定する試みが進められている。ガスタービンガバナ側軸受部は温度が200℃を超えることが多く、また取り付けスペースが狭いので、小型・耐高温センサが望まれている。

## 2.4 着火センサ

ガスタービンにおいては燃焼状態の把握と事故防止のために着火と火炎の状態を確認することが不可欠である。

火炎検出法として、通常、炎の光強度あるいは赤外線エネルギーを検出する方法とがある。より信頼性の高い紫外線の検出も行われている。

## 3. タービン各部における計測

センサ技術はセンシング対象によって技術的、費用的に成熟して一般に広く普及したもの、技術的に発展途上にあるもの、技術的に確立されているが費用的な面で使用困難なもの様々である。また、センシングの目的がガスタービンの運転環境の把握や状態監視、異常の早期発見や危険回避であることから使用されるセンサは、それ自体の技術的課題とガスタービンのセンシング対象となる部分の重要度との組み合わせにより規定されてくる。今後はさらに、ガスタービンの環境負荷低減や最大能力を引き出すといったような付加価値を創造するセンサ技術も必要になると思われる。本節では現状のガスタービン各要素におけるセンシング個所と測定物理量、センサ技術の問題点について述べる。

### 3.1 圧縮機

圧縮機の入口出口の温度・圧力を測ることによりその要素性能を把握できる。各センサの精度は同等レベルでなければならない。圧力についてはその信号精度を維持するために周波数に変換してから取り出す場合もある。圧縮機前段には吸気フィルタがあるのでフィルタ前後の差圧からその汚れ具合を推察することもできる。吸気口では温度と動・静圧から流量を算出できるが、動圧測定に際しては流れの方向に注意する必要がある。

### 3.2 燃焼器

燃焼器では、火炎の検出、圧力、壁面ならびに出口の温度などが計測される。燃焼器で使用されるセンサはその厳しい環境の故に全般的にその寿命は短く消耗品としての取り扱いが必要である。また、温度圧力ともに直接測定は困難である場合が多い。燃焼器出口温度はそのままタービン入口温度となりガスタービンにとって性能や寿命の根幹に関わるので精度の良い測定が必要である。しかしながら、高温下で使用する熱電対が高価であること、熱や振動によって破損した場合にタービン翼に深刻な損傷を与えることなどから燃焼器出口温度を測定していないガスタービンも存在している。測定個所は必要最低限にし、センサの保護措置を講じなければならない。

### 3.3 タービン

タービン出口温度は多くの場合周方向に数本の熱電対を配置して計測される。半径方向に計測する例も少ないが存在する。タービン入口温度を計測していないガスタービンでは、この出口温度の平均から入口温度を算出している。大半のガスタービンはこの出口温度を用いて運転制御されている。

また、タービン動翼の振動、表面温度やチップ・クリアランスを計測し信頼性ならびに性能向上といった付加価値を高めるモニタリングも行われている。技術的に確

立したチップ・クリアランス計測法として放電式と静電容量式の2種類がある。前者はセンサ先端を動翼先端に徐々に近づけセンサ先端にためられている電荷が放電を開始する条件からクリアランスを割り出す方法である。この方法は精度が高い反面放電が生じなかった場合、センサ先端と動翼とが接触しタービンに損傷を与えることがある。後者は電荷のたまったプローブ先端と動翼先端との静電容量の変化からクリアランスを割り出す方法である。以前はこの方法は精度と使用温度の点で制約が大きく実用的でなかったが、近年1000℃以上でも使用できる精度の高いセンサが開発され計測に使用されてきている。

### 3.4 軸受部

軸受部ではメタル温度、潤滑油温度ならびに振動のモニタリングが重要である。一般には温度計測に熱電対が、振動計測には渦電流式センサが使用される。このセンサは耐熱温度が低いため取り付け箇所や冷却方法などに工夫が必要である。また、軸受が摩耗・損傷したことによる金属片の検出には磁気チップ・ディテクタと呼ばれる磁気による検出方法が採用されている。

### 3.5 その他補機

ガスタービン周辺にはAFO (air, fuel, oil) の配管類が接続されている。空気・燃料では圧力と流量が、潤滑油では温度と圧力が重要である。圧力については小型のセンサが望まれており、大流量のガス燃料流量測定にはオリフィス式を採用していて実ガスでの流量試験が困難であるため空気によって流量較正を行っている。

### 3.6 排気煙道

近年、環境負荷の軽減がますます重要視されるようになった。そこで、排ガス中の有害物質をモニタするセンサが必要となる。代表的な有害物質は窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物、一酸化炭素、二酸化炭素、炭化水素などである。NO<sub>x</sub>は化学発光法や定電位電解法などにより計測される。NO<sub>x</sub>濃度はO<sub>2</sub>残存濃度で規定されているため、O<sub>2</sub>濃度も同時に計測しなければならない。酸素は他の元素に比べて磁気性が強いことから磁力を用いて濃度計測が行われる。一酸化炭素ならびに二酸化炭素は非分散型赤外線分析によって計測される。これらも定電位電解法によっても計測可能である。これら有害物質のセンサ装置は比較的高価であるため小型中型のガスタービ

ンでは負担となる。

## 4. センサ技術の課題と展望

本節冒頭でも触れたが、センサ作動原理が適用されるにあたり、与えられた使用環境において健全に作動することが重要である。この点に関しては、実験室レベルでの性能試験だけでは不十分で、実際の使用環境を想定した試験法確立が望まれる。

報告書<sup>(1)</sup>をまとめるに当たりガスタービンユーザに対してアンケート調査を行った。その中から現状での課題を要約すると、①コストの低減、②小型化、③耐熱性の向上、に集約された。また、排ガス流量に関しては未だ直接精度よくこれを測定する方法が確立されていないと言われている。常温大気中で使用されるコンピュータを初めとする電子機器類においては目覚ましい速度で小型化が進んでいる。一方、ガスタービンにおけるような高温環境下での使用に耐えるセンサの開発には、ユーザとメーカーとの連絡を密にしてさらに技術を積み上げていく必要があると思われる。

続いて、「データ処理技術の展望」(報告書第5章<sup>(1)</sup>)について概説する予定であったが、紙面も尽きたようなので下記紹介のみとさせていただきます。ここでは現状技術と技術動向について詳細な説明がなされているとともに、最新の主要文献が項目別に網羅されていてこの方面の優れたガイダンスとなっている。

終りに臨み、本稿はダイハツディーゼル(株)貝原正人氏、大阪ガス(株)古賀祥之助氏ならびに筆者による報告書第4章<sup>(1)</sup>を筆者の責任において要約したものであることを付記する。

### 参考文献

- (1) (社)日本ガスタービン学会調査研究委員会成果報告書、「ガスタービンにおけるモニタリング技術」、第26期調査研究委員会(2000)
- (2) 一ノ瀬昇, 小林哲二, 「センサとその応用」, 総合電子出版社(1980)
- (3) 西川甚太, 「工業計測」, 電気学会(1970)
- (4) 大森豊明, 「センサ実用辞典」(1995), あるいは「普及版センサ技術」(1998), フジ・テクノシステム
- (5) SHINKAWA.PRODUCT CATALOG, 新川電機(1999)

小特集・ガスタービンにおけるモニタリング技術

## 劣化診断・寿命予測技術

高橋 毅\*1  
TAKAHASHI Yakeshi佐藤 和憲\*2  
SATO Kazunori高瀬 等\*3  
TAKASE Hitoshi

キーワード：ガスタービン，モニタリング，劣化，損傷，診断，寿命評価

ガスタービンの劣化診断・寿命予測に関しては，メーカー，ユーザともに非常に強い関心を寄せている。

しかし，ガスタービンは，各部品の使用環境が厳しいだけでなく，劣化損傷要因・様相が多岐に亘ることから，現在においても重要な研究課題と位置づけられており，様々な研究が行われている。

## 1. ガスタービンにおける損傷・劣化事象の概要

まず，ガスタービンにおいて観察される損傷・劣化事象の概要について示す。表1にガスタービン各部に観察される損傷・劣化事象の概要を示す。クリープ，疲労などの金属構造物特有の損傷に加え，摩耗，腐食といった工学的に定量評価・予測の難しい損傷が多く，さらに，ガスタービンで不可欠の技術である各種コーティング層

表1 ガスタービン各部に観察される損傷・劣化事象の概要

部位	観察される劣化損傷事象	部位	観察される劣化損傷事象
燃料供給部	バルブスティックの摩耗	タービン部初段・2段静翼	耐食コーティング機能劣化
	バルブシートの摩耗		遮熱コーティング剥離・摩耗
	バルブシートの腐食		遮熱コーティング機能劣化
吸気部	燃料フィルターの損傷・つまり	タービン部2段・3段以降降静翼	アブレーションの摩耗
	フィルターつまり		ハードコート欠損
コンプレッサー	翼腐食	タービン部初段動翼	変形(翼、シール部)
	翼摩耗		打痕
	異物堆積		耐食コーティング剥離
	打痕		焼損(翼端部など)
	翼変形		高温酸化(翼端部)
	翼欠損		き裂
	シール、分配部欠損		打痕
	抽気弁のもれ		異物堆積
	抽気弁のスティック		耐食コーティング剥離・摩耗
	バーナ焼損・変形		耐食コーティングき裂
燃焼部	バーナ部高温酸化	タービン部2段以降動翼	耐食コーティング機能劣化
	燃料噴射口異物堆積		遮熱コーティング剥離・摩耗
	燃料噴射口摩耗		遮熱コーティング機能劣化
	火炎検知器誤動作		変形(翼、シール部)
	燃焼器変形		き裂
	燃焼器酸化減肉	打痕	
	燃焼器き裂	耐食コーティング剥離・摩耗	
	燃焼器材料劣化(接続部)	耐食コーティングき裂	
	尾筒変形	耐食コーティング機能劣化	
	尾筒摩耗(接続部)	シャフト	連結ボルト変形、割れ
	尾筒き裂		軸受け摩耗
	尾筒材料劣化		無冷却部高温酸化
	火炎伝播管摩耗		内部保温材飛散
	耐食コーティング剥離・摩耗		エキスパンション破損
	耐食コーティング機能劣化	排気ダクト	サイレンサー金属部腐食
遮熱コーティング剥離・摩耗	吸音材飛散		
遮熱コーティング機能劣化	異物混入		
き裂	劣化		
変形	部品劣化		
タービン部初段・2段静翼	高温酸化	制御系	絶縁劣化
	打痕		センサー接続部劣化
	異物堆積		動作不良
	耐食コーティング剥離・摩耗		

原稿受付 2001年1月9日

\*1 (財)電力中央研究所 横須賀研究所 プラント熱工学部  
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1

\*2 川崎重工(株) 汎用ガスタービン事業部 システム品質保証部

\*3 関西電力(株) 火力エンジニアリングセンター



の劣化・損傷も特徴的である。多くの事象は定期検査時に発見され、運転時にそれらが検知されることは少ないのが特徴である。これは回転機器のため損傷・劣化を検知するための各種信号が捕らえにくいことと、高圧燃焼システムが不可避であるためセンサの設置が環境的に難しいことに起因しているためと考えられる。また、損傷として認識されるが、運転上は問題のないものも多い。

部品寿命が従来機器に比べ短いこと、部品設計評価において判断基準となる工業規格（JIS, ASTM, DIN など）が適用されないため、損傷と劣化の区別が付けがたいことも特徴である。

表2に事業用ガスタービンに対して行われている保守管理項目を、また表3に対策事例を示す。保守管理項目については、目視検査、非破壊検査が、通常機器と同様になされているが、その検査対象の多くが定量評価の難しい事象であることがひとつの特徴である。また、部品点数が膨大であることを考えるとその労力・コストは、かなりの量になるものと思われる。対策事例からも判るように、オンライン監視の難しい点は従来火力機器と同様であるが、主要部品の設計変更が明確な対策として捉えてある点は、ガスタービンの大きな特徴であろう。

表2 事業用ガスタービンにおける保守管理項目

機器	部位	保守・管理内容	
定検・自主検査時	G T	圧縮機	亀裂、変形、磨耗、剥離の有無、抽気弁漏れなどの確認
		燃料系	弁機構動部の磨耗、焼付き等の確認
		燃焼器・尾筒	亀裂、変形、磨耗、剥離、詰まりの有無の確認
		タービン	亀裂、変形、磨耗、剥離、詰まりの有無の確認
		シュラウド	亀裂、変形、磨耗、剥離の有無の確認
	HRSG	潤滑系	潤滑油の性状劣化、フィルタ詰まり等の確認
		軸受	磨耗、焼付き等の確認
		冷却系	オキシドの腐食、漏れ等の確認
		車室	ロータとの摺損、亀裂等の確認
		伝熱部	付着物等の確認
その他	ダクト	内張りの剥離等の有無	
	各部ジョイント	溶接部や熱伸び部の破損等の確認	
	吸気フィルタ	汚損、詰まり等の確認	
	起動装置	油漏れ、モーターグリス量等の確認	
運転時	G T	ST	亀裂、変形、磨耗、剥離の有無の確認
		圧縮機	圧縮機効率の確認、油量の確認
		燃料系	燃料発熱量の変動確認
		燃焼器	スワラ温度、失火の確認
		タービン	タービン出口ガス温度、冷却空気温度の確認
	その他	軸受	軸振動の確認
		吸気フィルタ	差圧の確認

表3 事業用ガスタービンにおける各種対策事例

機器	部位	事象	対応策	
G T	圧縮機	損傷	運転条件の変更	
		効率低下	洗浄液やライスによる翼のクリーニング	
	燃料系	弁機構磨耗	定期的な点検	
		発熱量変動	オンライン監視	
	燃焼器・尾筒	損傷	冷却構造変更やコーティングの採用等	
		失火、温度上昇	オンライン監視	
	タービン	損傷	冷却構造変更やコーティングの採用等	
		温度上昇	オンライン監視	
	HRSG	シュラウド	損傷	冷却構造変更やコーティングの採用等
		潤滑系	潤滑油劣化	定期的な点検
軸受		磨耗	定期的な点検	
冷却系		軸振動大	オンライン監視	
車室		腐食、漏れ	定期的な点検	
その他	伝熱部	損傷	定期的な点検	
	ダクト	付着物	定期的な点検	
	各部ジョイント	内張り剥離	定期的な点検	
その他	吸気フィルタ	詰まり	構造変更	
	起動装置	油漏れ	多量フィルタの採用	
その他	ST	損傷	定期的な点検	

2. 損傷・劣化診断技術・評価技術の研究開発状況

このような損傷劣化に対する診断・評価技術の研究開発も活発である。コーティングに関する研究、材料に関する研究、構造物としての部品寿命に関する研究が、この数年のあいだに非常に数多くなされている。

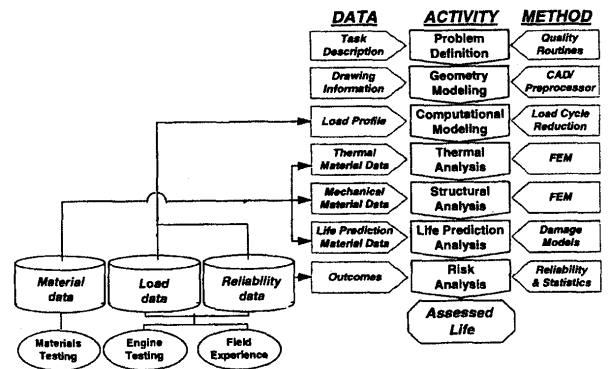
1) プラント全体に関する研究

Lodeby ら<sup>(1)</sup>は不確実性の観点から確率論モデルを用い、図1に示すフローの下で、異なる寿命を持つ三つの部品を有するエンジンの寿命予測手法について検討している。現在不確実性に最も大きく寄与するのは材料特性データであるが、吟味された経験データの収集と分析により、提案する手法は効果的な（過度に安全側に評価しない）寿命を提供できるとしている。

2) タービン部に関する研究

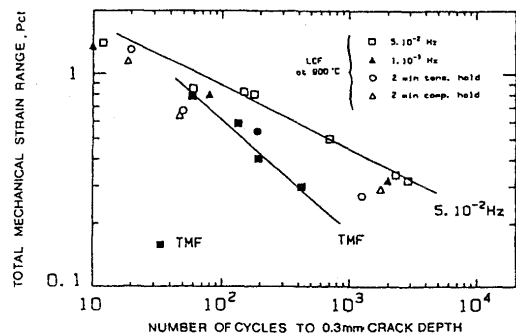
Didekind ら<sup>(2)</sup>は、軍用航空機の初段静翼の損傷に関し、数値流体力学による振動解析と実機損傷の詳細分析による結果を照らし合わせ、図2に示されるように、材料評価の方法によって設計寿命が異なること、2次元解析と3次元解析とは異なる寿命を与えること、3次元解析結果とLCF（低サイクル疲労）評価結果が実機損傷と合致すること、さらにその原因がアイドル時の高温燃焼ガスが原因であること、などを示している。

Tabakoff ら<sup>(3)</sup>は、塩化物、火山灰と、ダスト、酸化鉄等を想定し浸食予測のための数値解析、軍用機エンジン



Generic description of the life prediction process at Volvo Aero Corporation

図1 不確実性理論に基づくエンジン寿命予測フロー<sup>(1)</sup>



Comparison of life to 0.3mm crack depth vs total mechanical strain range under TMF cycling and LCF life at 900°C to 0.3mm crack depth under various strain cycles<sup>9)</sup>.

図2 材料評価方法の違いによるき裂到達予測結果の比較<sup>(2)</sup>

による試験を行っている。試験は、フライアッシュ（石炭灰）を用い実施され、翼表面の損傷計測を様々なガスタービン材料に対して行っている。特殊な高温高速風洞（815℃，183 m/s—366 m/s）で、図3に示されるような浸食試験を実施している。タービン翼の粒子浸食に関しては、高温での統一された試験結果が少なく航空機エンジンばかりでなく、PFBC用ガスタービンの劣化事象解明にも有益な情報と考えられる。

Hepworth ら<sup>(4)</sup>は、解析的手法を用いシーメンス V 94.2 を対象に、動静翼の定常非定常の温度解析、応力解析を行い、さらに酸化によるき裂進展を考慮した、図4のような寿命評価を行っている。単純なクリープ—疲

れ損傷予測は、サービス経験と比較して過度に長いライフを予測すること、現実的な予測には、酸化—疲れ損傷モデル（運転時間の経過とともにき裂進展速度が増加するモデル）が必要であるとしている。

Cheruvu ら<sup>(5)</sup>は、GE MS 5002, 6002 B, WH W 501 D 5 を対象とし各種コーティングの寿命評価研究を行っている。コーティングの劣化は温度に依存するが、その測定の高難しさから、温度と相関のある運転時間と起動停止回数で寿命予測が可能であることを示し、図5に示す COATLIFE モデルを提案している。

吉岡 ら<sup>(6)</sup>は、高温部品全般に関する金属学的なアプローチからの寿命評価研究を報告している。多くの報告

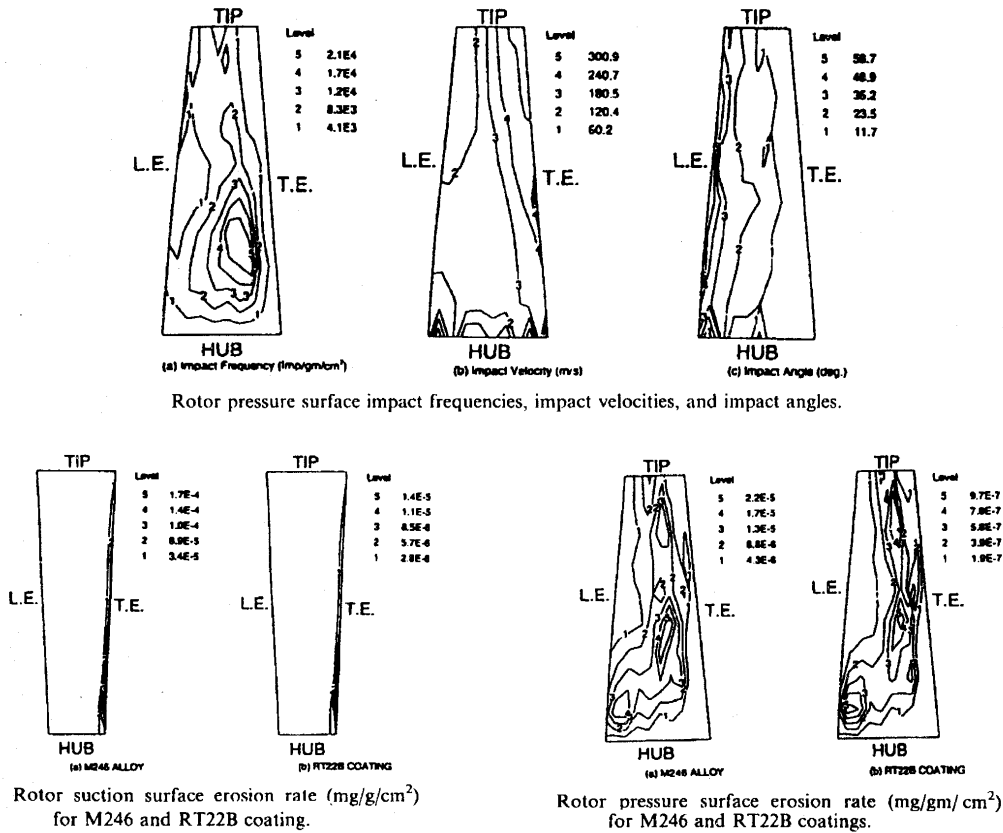
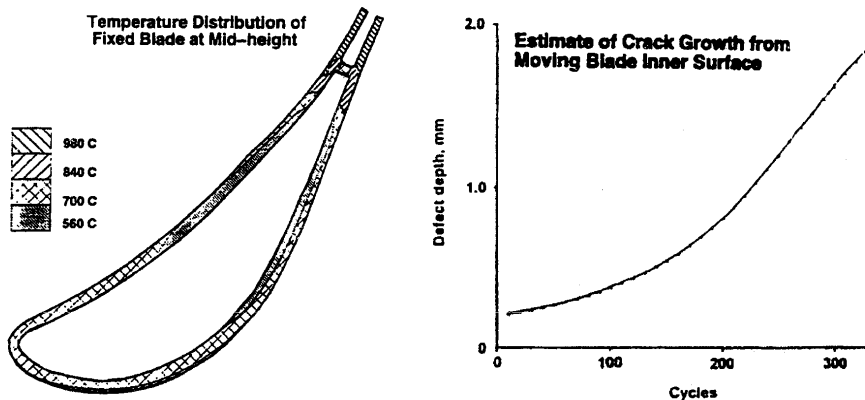


図3 石炭灰による動翼材の高温高速浸食試験結果の1例<sup>(3)</sup>



a) 静翼温度分布解析例      b) 動翼内面き裂進展速度検討例

図4 静翼温度分布解析例と動翼き裂進展速度検討結果例<sup>(4)</sup>

者が行っている劣化損傷事例の解析的評価に加え、図6に示すような現象シミュレーションによる状態予測に注目している点が特徴である。

藤井ら<sup>(7)</sup>は、GE-7001 Eの初段静翼を対象に、評価部位を28の領域に区分し、実機データを元に、き裂進展予測システムの開発を進めている。き裂は、図7に示されるように、部位により進展状況、進展因子が異なり、十分なデータがあれば高い精度で各部のき裂が定量予測可能と報告している。

Viswanathan<sup>(8)</sup>らは、動静翼の寿命評価に関し、コーティングと基材との関係を考慮した寿命評価法提案に向けての研究を実施している。GE MS 7001 B, E, EA, 7 FA/9 FAを対象に、GTD 111 DS, IN-738 LC (基材)とGT-29, GT 29+, GT 33+, PWA 286 など様々な組み合わせでの寿命評価に取り組み、図8のような寿命評

価線図を示し、基材以上にコーティング寿命評価の重要性を指摘している。

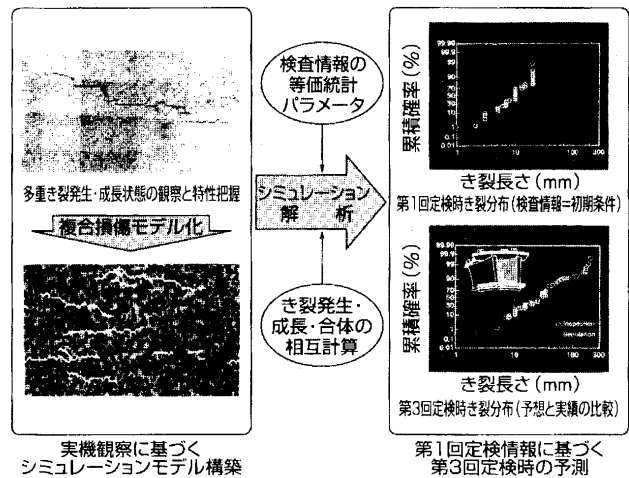
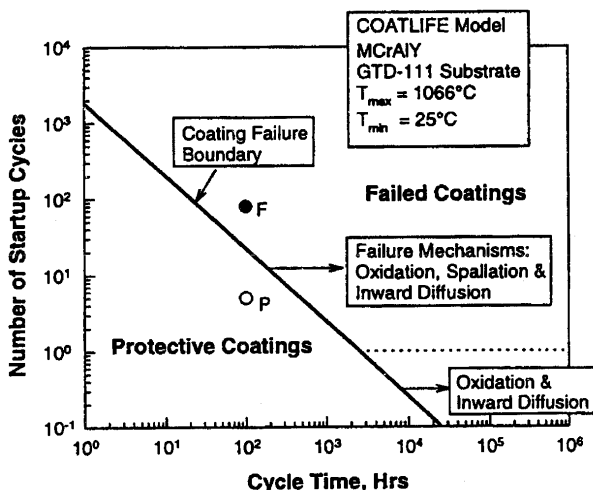


図6 高温部品寿命評価システム提案例<sup>(6)</sup>



Coating life diagram calculated via COATLIFE shows the protective and failed regimes of MCrAlY-coated GTD-111.

図5 COATLIFEモデルによる MCrAlY + GTD 111 の寿命評価予測例<sup>(5)</sup>

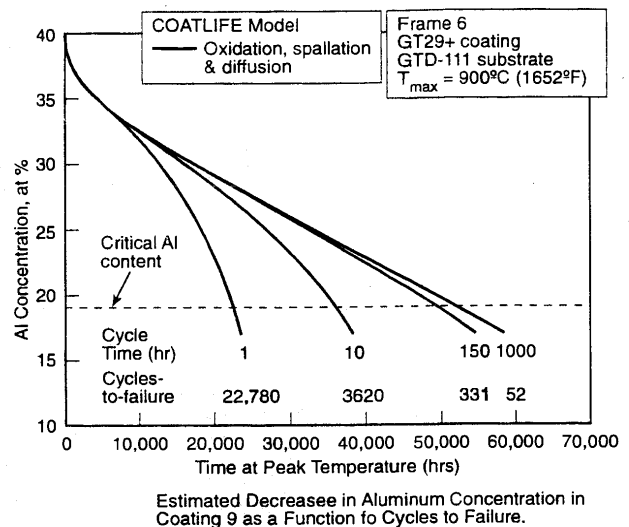
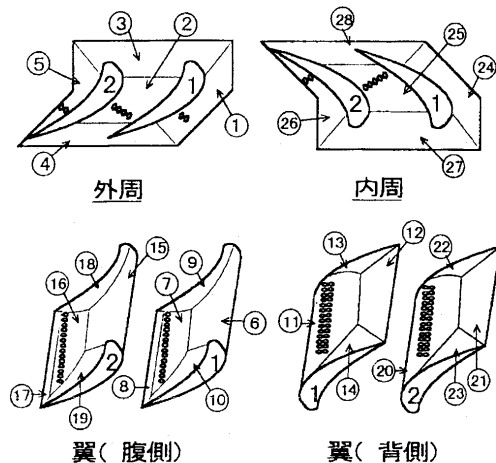
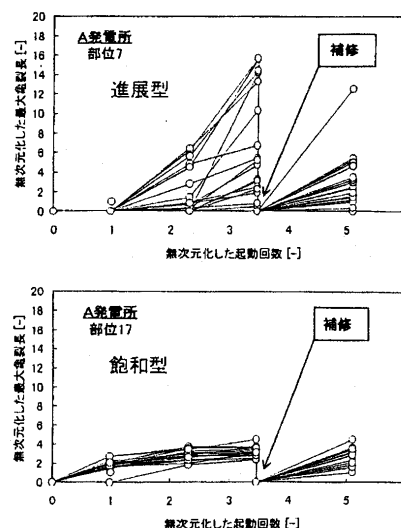


図8 Viswanathan らの動翼寿命評価システム例<sup>(8)</sup>



静翼の部位と亀裂進展状況

図7 藤井らによる静翼き裂傾向管理分析例<sup>(7)</sup>



3) タービン部以外に関する研究

Mulligan ら<sup>(9)</sup>は、ALISON-T 56 エンジンの主に高温部品部の損傷を診断するため、図 9 に示す装置を用い、排気の赤外線分布から、高温部を特定し、損傷箇所との対応が明確であることを指摘している。同時に、一般的な計測法であり実機でも数多く採用されている熱電対による排気ガス温度計測は、多くの複雑な要因を含む誤差を有するため、損傷との対応は取れなかったとしている点は興味深い。

4) コスト低減に関する研究

森塚ら<sup>(10)</sup>は、国内 GT 複合発電所を対象に、図 10 に

示すような「保守最適化支援プログラム」を開発している。複数軸を有する LNG 複合発電所の保守計画作成支援プログラムの開発を報告しており、特に保守コスト低減のための、高温部品の残存寿命の最小化による最適化手法を提案している。

損傷劣化モニタリングに関しては、マイクロプロセッサの高機能性を生かし、いわゆる人工知能としてプロセスの状態判断機能が様々に検討されてきた。人工頭脳 (AI)、自己学習機能 (ニューロ)、ファジー理論、さらにニューロファジーなどである。しかしこれらは、マイクロプロセッサが制御や自動化の急速な高度化を進めて

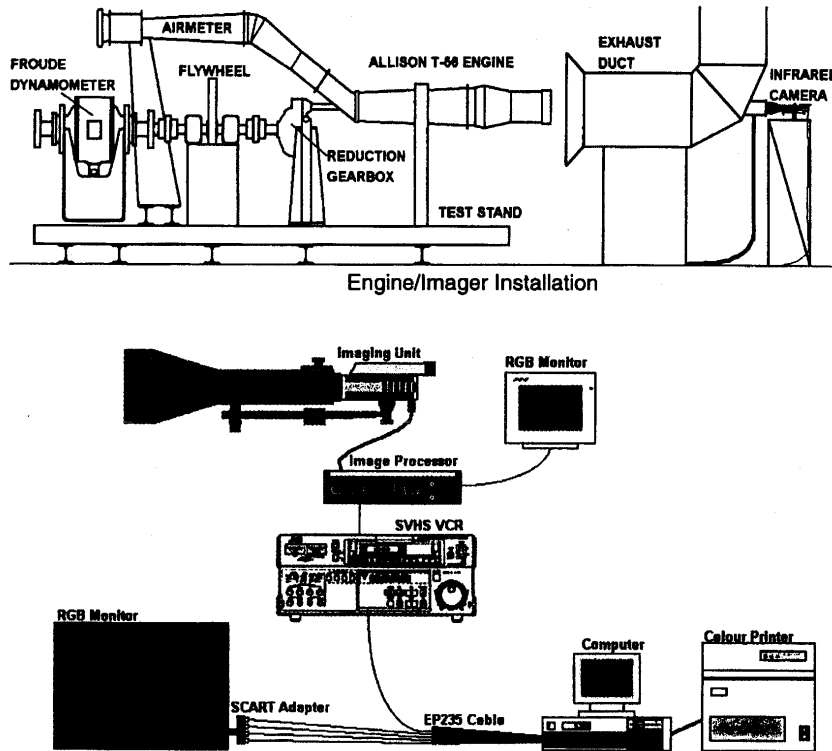


図 9 Mulligan らの高温部品損傷評価手法<sup>(9)</sup>

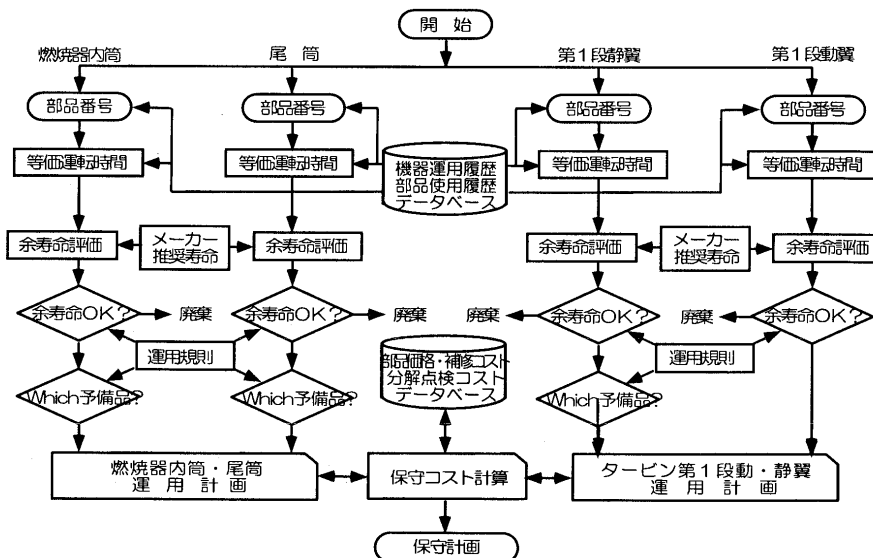


図 10 森塚らの保守最適化支援プログラムフロー<sup>(10)</sup>

きたのとは対照的に、殆ど役に立たないと言う認識が生まれるほどトーンダウンしている状況にある。

しかし近年、運転支援としての機能に特化した検討も行われており、特に、2次元、3次元表示機能を用いてのデータ解析・分析手法が、効果を上げてきている。

これらは、言い換えれば、熟練者の「カン」の部分マイクロプロセッサの持つ多様な表現技術で運転・保守業務を補うものであり、今後の進展が期待できる分野である。

### 3. まとめ

以上示すように、劣化損傷、寿命評価技術に関する現状ならびに研究開発状況は、全般的に材料レベルの評価にとどまっているものがほとんどであり、実機適用レベルに達しているものはわずかである。さらに、寿命時間、各部温度など重要な図表が無次元化されたものが多く、各人の研究成果を横並びに比較検討できないなど、ガスタービン損傷・劣化に対する様々な研究開発の定量的評価の難しさを示している。

また、学術分野別には、特に重要な高温部品の寿命は燃焼器では燃焼ガス温度、動翼・静翼では、低サイクル疲労の定量化が重要であること、材料特性のばらつきが寿命予測を難しくしていること、非接触でのモニタリングシステムが有効であること、などが共通した指摘事項となっている。

さらに、きわめて汎用な技術ではあるが、運転支援の形でのマイクロプロセッサの高度利用が効果を上げつつある。

劣化診断ならびに評価技術の現状、研究開発状況を取りまとめると、

- a) 従来以上に、劣化診断寿命評価のキーテクノロジーとしての材料評価技術の統一化、特に、基材+コーティングのような複合場での新しい評価技術の確立が求められていること。
- b) 様々な損傷を的確に計測できるモニタリング手法開発が重要な技術開発課題となっていること。
- c) 従来は、プラントあるいはシステムの運転に必要なセンサを流用する形で各種診断が行われていたが、センサ数の少ないガスタービンにおいては、劣化診断に必要な専用のセンサ開発が非常に強く求められていること。

d) 可視化技術、状態比較機能などを備えた運転監視高度支援システムへの期待が大きいこと。

と、判断できる。

一方、「個別余寿命推定」という観点からは、例えば、材料評価の分野では、Factor of 2 の概念が一般的であるが、設備の延命化を図る場合、残存寿命が10年を平均としてほぼ5年から20年 (factor of two on life) の予測範囲、予測精度では役に立たない。この精度を上げるには、定検時の個別データの蓄積によって予測値を修正するといった手順が必ず必要である。

基本的に重要なことは「対象となる部材の寿命を支配する損傷 (damage) の物理的内容は何か、それを定量的に評価するためには如何なる方法を用いればよいか」を先ず明らかとし、その後、「損傷を引き起こす事象は何か」を特定することであろう。

劣化診断・寿命評価においても、オンラインモニタリング、定期検査時の非破壊検査のようなオフラインモニタリング、運転支援など、今後の技術進展への要求は強く、メーカーのみならずユーザにおいてもデータ公開も含めた積極的な技術開発が期待される。

### 参考文献

- (1) K. Lodeby, O. Isaksson, N. Jarvstrat, Fatigue Design, Vol 1, 1998, p 39-48
- (2) M. O. Didekind, L. E. Harris, Int. J. Pres. Ves. & Piping, 6-6-1996-59-76
- (3) W. Tabakoff, A. hamed, V. Shanov, Int. J. of Rotating Machinery, Vol 4, No. 4, 1998, p 233-241
- (4) J. K. Hepworth, J. D. Wilson, J. M. Allen, G. H. Quentin, G. Touchton, ASME, 97-GT-446-1997
- (5) N. S. Cheruvu, BALTICA 4, vol 1, 1998, p 79-81
- (6) T. Kondo, Y. Yoshioka, K. Fujiyama, 東芝レビュー, Vol 54, No. 5, 1999
- (7) T. Fujii, T. Takahashi, K. Kubo, 電中研研究報告 W 98301, 1999-3
- (8) R. Viswanathan, J. Scheibel, D. W. Grangy, Edinburgh, The Institute of Material, London, October, 1999
- (9) M. F. Mulligan, J. D. MacLoad, AGARD PE Sympo., 1997, 7-1
- (10) H. Morituka, T. Fujii, T. Takahashi, 電中研研究報告, W 98020, 1999-4

## スーパーマリンガスタービンの要素研究について

杉本 隆雄\*<sup>1</sup>  
SUGIMOTO Takao

識名 朝春\*<sup>2</sup>  
SIKINA Tomoharu

宮地 宏\*<sup>1</sup>  
MIYAJI Hiroshi

加藤 利夫\*<sup>3</sup>  
KATO Toshio

濱地 康之\*<sup>4</sup>  
HAMACHI Yasuyuki

中西 謙一\*<sup>5</sup>  
NAKANISHI Kenichi

田中 道雄\*<sup>6</sup>  
TANAKA Michio

川元 満生\*<sup>6</sup>  
KAWAMOTO Mituo

キーワード：船用ガスタービン，低NO<sub>x</sub> 燃焼器，再生サイクル，熱交換器，圧縮機，タービン，冷却翼，高温腐食，可変翼

### 1. はじめに

1997年から国内のガスタービンメーカー5社が共同して、低NO<sub>x</sub>で、高効率な次世代型船用ガスタービン(Super Marine Gas Turbine, 以下SMGT)の研究開発を実施している。

SMGTはNO<sub>x</sub>排出量を1g/kWh以下、熱効率38~40%、A重油使用可を開発目標とする2500kW級船用ガスタービンであり、主として内航船主機を想定している。

研究開発期間は6年間で、最終年度に2500kW級実験機で性能評価をするが、現在までは、高い性能目標を達成するため燃焼器、熱交換器、圧縮機、タービン等の要素毎の研究を実施してきた。

低NO<sub>x</sub>化のためには、液体燃料焚き(A重油)DLN燃焼器の開発。

高効率化のためには、再生サイクルの採用とプレートフィン型熱交換器開発、軸流+遠心の複合型の高効率圧縮機開発、タービン入口温度の高温化に対応する冷却翼開発等の要素研究を実施している。

本報では主としてこの要素研究の概況を報告する。

なお、本研究開発の背景・目的やSMGTの基本仕様については、既報<sup>(1),(2)</sup>を参照されたい。

### 2. SMGTの開発目標

SMGTの主な開発目標を改めて記すと次の3点である。

- 1) NO<sub>x</sub> 排出量が1g/kWh以下
- 2) 熱効率が38~40%

原稿受付 2001年1月15日

\*1 川崎重工業(株)

\*2 石川島播磨重工業(株)

\*3 (株)新潟鐵工所

\*4 ヤンマーディーゼル(株)

\*5 ダイハツディーゼル(株)

\*6 スーパーマリンガスタービン技術研究組合

〒105-0003 東京都港区西新橋1-5-14 信栄堂ビル6階

3) 燃料はA重油が使用可能

1)のNO<sub>x</sub>値はディーゼルエンジンでは最もNO<sub>x</sub>排出量の少ない高速ディーゼルの約1/10であり、2)の熱効率は高速ディーゼルエンジンにほぼ匹敵する。

また、これを同出力クラスの産業用ガスタービンと比較すると、NO<sub>x</sub>排出量では現状値(液体燃料焚)の1/3、熱効率では10%ポイント向上、即ち、燃費で約3割改善を目指す意欲的な目標である。さらに、燃料は船用としての入手性を考慮してA重油を使用可能とする。

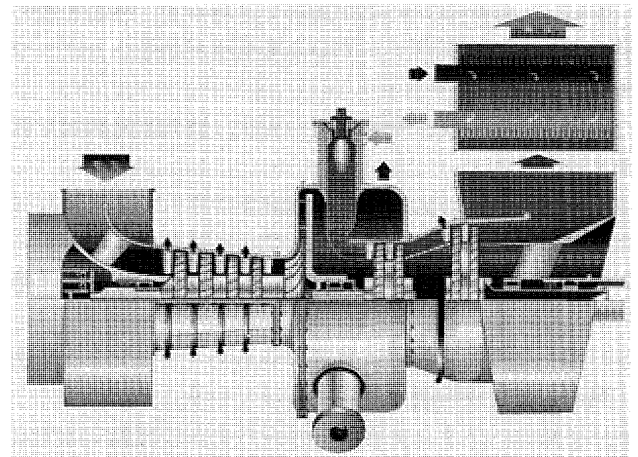


図1 SMGT概念図

### 3. 要素研究課題

上述の様に、SMGTの開発目標性能は同クラスの従来ガスタービンの水準を大きく超えるものであり、燃焼器、熱交換器、圧縮機・タービン等の各要素とも従来水準を超える性能が要求されている。

このための主要研究課題は次のとおりである。

- 1) 低NO<sub>x</sub>燃焼器；低NO<sub>x</sub>化の方法として水または蒸気を注入する湿式もあるが、清水を多量に要するので船用には適さない。SMGTは希薄燃焼方式による乾式低NO<sub>x</sub>燃焼器の開発研究を実施してい

表1 各要素の目標性能

項目	単位	定格点目標性能	
		F型	V型
出力	kW	2,590	2,530
熱効率	%	39.1	38.4
空気流量	kg/s	9.5	
圧縮機	回転数	rpm 21,000	
	圧力比	8.0	
	断熱効率	%	84.0
熱交換器	温度効率	% 83.0	
燃焼器	燃焼効率	% 99.0	
ガスジェネレータ・タービン	回転数	rpm 21,000	
	入口ガス温度	°C 1,200	
	断熱効率	% 87.5	
パワータービン	回転数	rpm 13,000	
	断熱効率	%	90.2
NOx 値	g/kWh	1.0 ≒ 200ppm (O <sub>2</sub> =0%)	

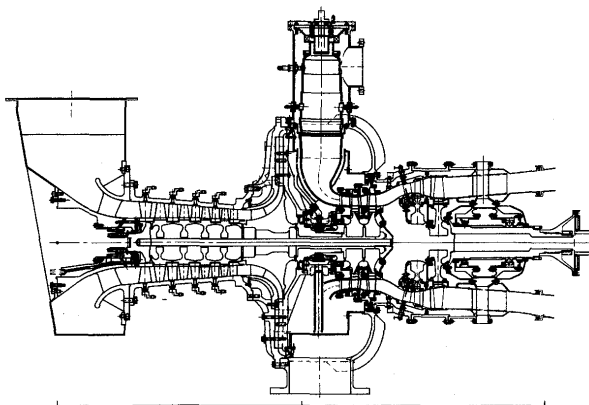


図2 SMGT 断面計画図 (V型)

る。

- 2) プレートフィン型再生熱交換器；熱効率の飛躍的向上のため再生サイクルとする。小型で高効率，さらに耐久性・製作性等を検討し，再生熱交換器はプレートフィン型を採用し，この研究開発を実施している。
- 3) 高効率圧縮機；従来の2000 kW級ガスタービンでは遠心圧縮機を採用する例が多いが，より高効率化出来るものとして，圧縮機は軸流型+遠心型の形式とし，この複合形式の圧縮機を開発している。
- 4) 高温化(冷却翼)；さらに，熱効率向上のためタービン入口温度は同クラスの従来ガスタービンより高い1200℃に設定した。このため，高温化を目指した冷却翼の開発研究を実施している。
- 5) 部分負荷効率改善；船用エンジンとして部分負荷時の熱効率向上も重要な課題である。この熱効率改善を狙った可変型SMGTも開発する。これはパ

ワタービン静翼を可変としたもので，これで部分負荷時に流量制御し，熱交換器入口の排気ガス温度を定格運転時と同じに高く保つことにより熱効率向上を図るものである。

- 6) 船舶対応技術；船用エンジン固有の課題として，塩分や燃料成分による材料腐食に対する耐食材料や防食コーティングの最適選定のための評価試験。

制御システムとしては再生2軸式ガスタービンの波浪等による急激な負荷変動に対する応答や，前項に述べた部分負荷熱効率改善のための可変部制御等の課題があり，これらを取り入れた制御システムの開発を実施している。

4. 各要素研究の現況

前述したSMGTの要素研究課題につき，以下に現在までの概況を述べる<sup>(3)</sup>。

4.1 低NOx燃焼器

従来の拡散燃焼方式に替えて，予蒸発・予混合希薄燃焼方式による液体燃料(A重油) 焚きの低NOx燃焼器を研究開発している。

周知の様に，希薄燃焼方式は最高燃焼温度が下がり，Thermal NOxの発生が抑制されるが，反面，未燃分が出たり，不安定な燃焼になり易い面もある。着火から全負荷迄安定して燃焼させ，かつ，出来るだけ広い負荷範囲で低NOxを保持出来る燃焼器を開発するには様々な課題解決が必要である。

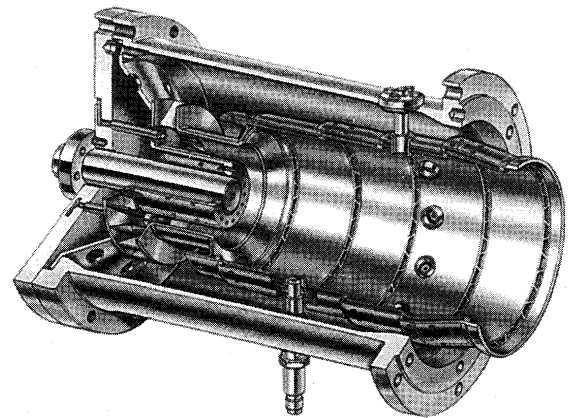


図3 燃焼器概念図

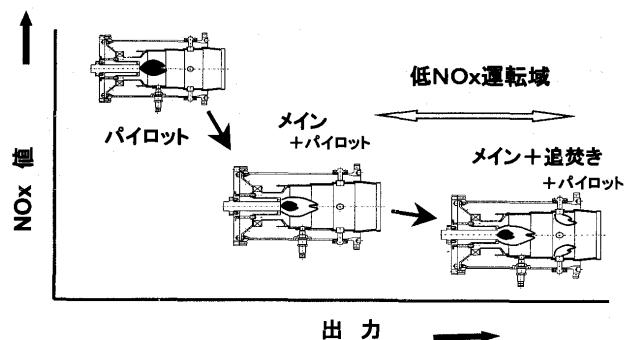


図4 バーナの制御

開発中の燃焼器は3種類のバーナを持つ形式で、①火種としてのパイロット・バーナ ②燃料を空気と良く混合させて希薄混合気を作り(予蒸発・予混合)、燃焼させるメインバーナ ③全負荷近辺でメイン燃焼域の後方に燃料を噴霧して燃焼させる追焚きバーナである。着火から全負荷まで燃料流量増加に従って図4に示す順で各バーナに供給する燃料を制御する。これにより広い範囲で低 NOx 運転が維持出来る。

この開発のため、燃料噴射ノズルの噴霧特性把握と改良試験、メインバーナ部単独の NOx emission と燃焼効率向上や燃焼安定性の改良試験、燃焼器ライナ内流れの詳細把握するための流れ模型試験(図5)等の個別研究を行った。これら個別研究の成果を逐次採り入れ燃焼器の改良を行っている。燃焼器の性能評価は単缶の燃焼器試験で行いつつ、全体的改良を行っている(図6)。

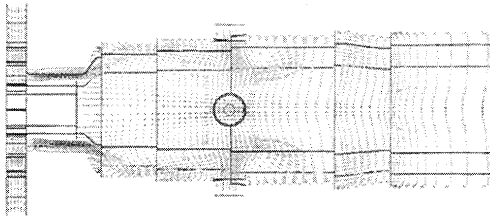
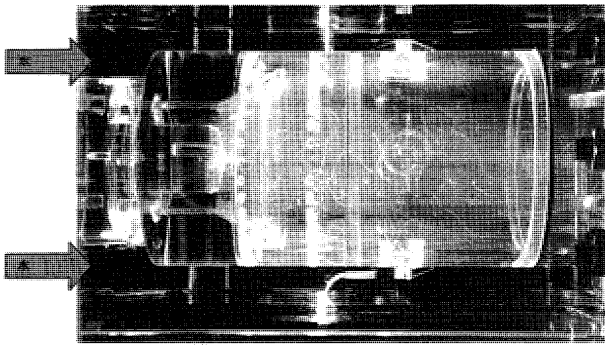


図5 燃焼器ライナ内部流れの可視化とCFD

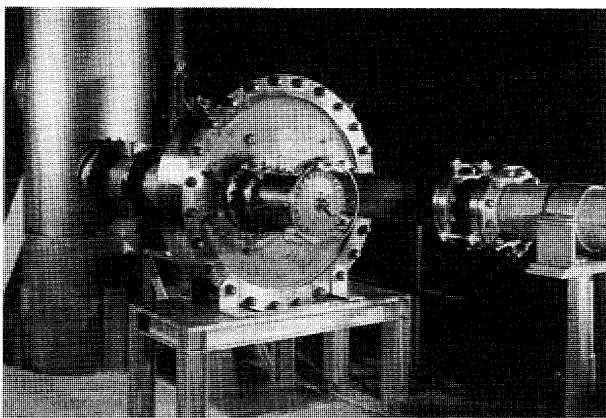


図6 燃焼器試験装置

今までの研究で、既に、広い負荷範囲(広い空燃比範囲)で目標の低 NOx 運転が達成出来る見通しを得ている。

4.2 熱交換器

再生熱交換器はエンジン熱効率向上の鍵を握っており、性能が高く、コンパクトであることが船用として要求されている。

表2は各種形式の熱交換器を比較検討した例である。シェル&チューブ型は機器容積が大き過ぎる。回転蓄熱型はシール性の問題から低圧力比のものにしか用いられない。プレートフィン型とプライマリーサーフェス型とは後者が少し小型になるが、特に大型化の際の製作性を勘案してSMGTではプレートフィン型を採用した。

表2 熱交換器の形式比較

形式	プレートフィン型	プライマリーサーフェス型	シェル&チューブ型	回転蓄熱型
熱伝達	◎	○	△	◎
熱通過率	○	△	×	◎
伝熱面積密度	○	○	△	◎
容積比	○	○	×	◎
シール性	◎	○	◎	×
強度	◎	○	◎	○
耐久性	◎	○	◎	○
大型化	○	△	○	△
評価	◎			

開発中のプレートフィン型熱交換器のコア部概念図を図7に示す。コア部は、高さ数mmの多数のフィンを取付けた排気ガス通路と空気通路が、隔壁で隔てられて交互に積層される。その隔壁とフィンを通じて、ガスと空気が熱交換する。全体では100対以上を積層する。

図7で排気ガスは下から上へ、空気は逆に上から下に流れる。各層中央部(向流部と称する)で排気ガスと空気の流れ方向が対向しており、熱交換は殆どこの部分で行われる。この向流部のフィンはガス側、空気側共に、熱伝達を促進するため流れ方向にオフセットされた形状(図8)をしている。

開発に際しては、熱交換性能、圧力損失、熱応力の解析・検討とともに、10対程度の部分積層モデル(単層は実物と同じ)を製作して、熱交換器単体の性能を評価

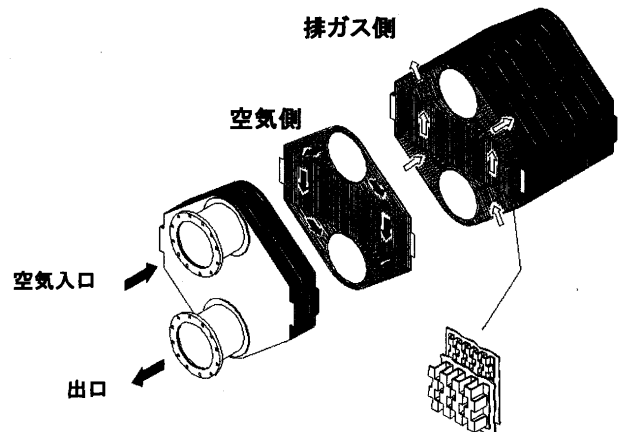


図7 熱交換器概念図



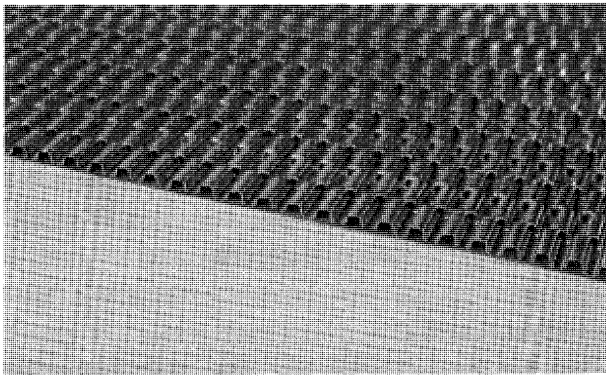


図8 空気側オフセットフィン

する試験を行う。同時に、この部分積層モデルの製作を通じて、耐熱鋼を細密オフセットフィンに加工し、国内最大級のプレートフィン型熱交換器コア部として組み立てる技術の確認も行う。

また、熱交換器入口で排気ガスの偏流が生じると、温度効率が低下する。そこで、熱交換器入口で出来るだけ一様なガス流れとなるイグゾースト・ディフューザ形状を模型試験（図9）により確認している。

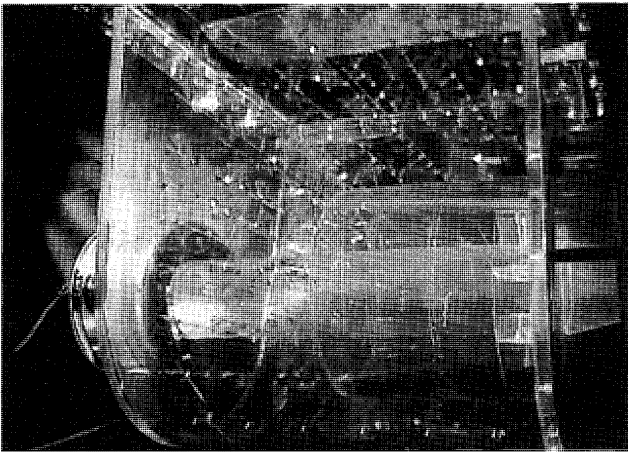


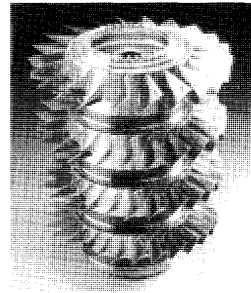
図9 熱交換器入口流れ試験

#### 4.3 圧縮機

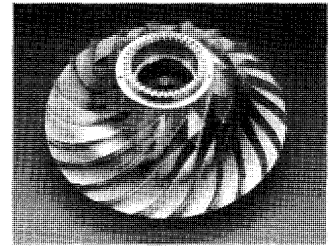
圧縮機効率がガスタービンの全体効率に与える影響は大きく、全体熱効率改善のためには圧縮機を出来るだけ高効率にする必要がある。2 MW クラスのガスタービンでは、構造簡単で実績も多い遠心圧縮機を採用する例が多いが、SMGT では高い効率達成のために低圧部を軸流4段に、高圧部を遠心1段とした。

なお、軸流段は入口案内翼 (IGV) を含め全段静翼 (最終4段は除く) を可変にしたV型とIGV 以外は固定静翼としたF型の2種類を開発している。V型は部分負荷時の効率改善を意図した後述の可変静翼パワータービンと組合せる計画である。

開発に当たって最新CFDによる翼列流れの解析と共に、軸流段、遠心段の各々の単独性能試験と両者を組合せた全段性能試験も行い、性能を実測して評価・改良を進め



V型軸流圧縮機ロータ



遠心圧縮機インペラ

図10 供試圧縮機

る方法を採用している。

現在はこれら試験の途上である。軸流段と遠心段を組合せた性能試験の概観を図11に示す。

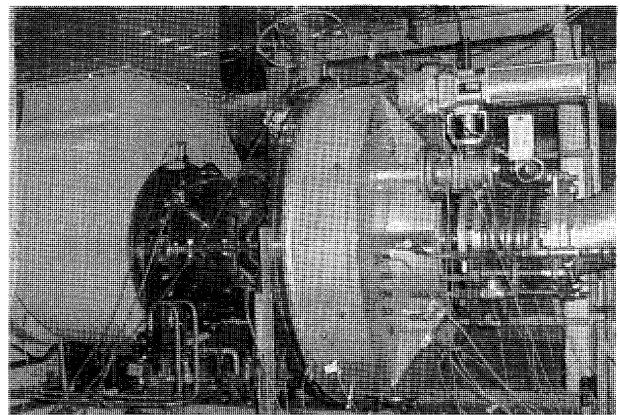


図11 圧縮機試験

さらに、マッハ数が最も高くなる軸流初段について回転翼列試験による最適翼列の研究や圧縮機入口における速度分布の一様性確保と損失を最小化する入口ケーシングの最適形状を求める研究（図12）を行った。これら

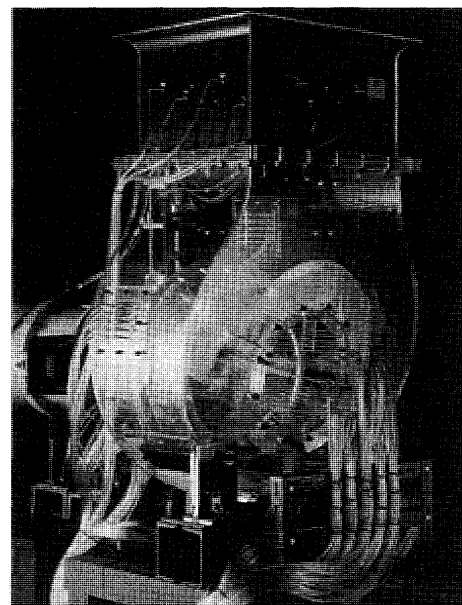


図12 圧縮機入口ケーシング

の成果を圧縮機設計に採り入れている。

#### 4.4 冷却翼

高温材料と翼冷却技術の進歩により年々タービン入口温度は高温化しているが、小容量ガスタービンでは翼が小さく複雑な冷却構造の加工が難しいので、大容量ガスタービンほどは十分な翼冷却が出来ない。従って、小容量ガスタービンでは高温化がより難しいという問題がある。

SMGTは同クラスの従来ガスタービンの水準を50~100℃上回るTIT=1200℃を目標としているが、小さな翼でも効率的に冷却出来る翼内部の冷却構造の研究開発が不可欠である。

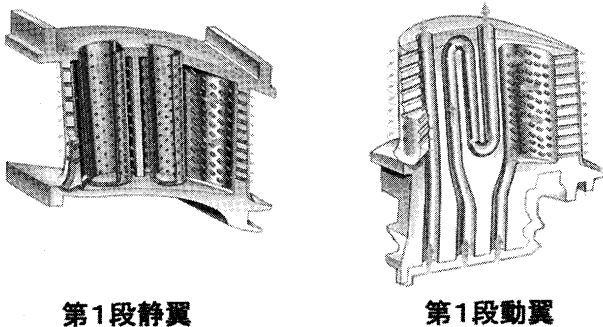


図13 冷却翼概念図

具体的には、熱流体数値計算による冷却翼性能解析の他、翼内部冷却流路の拡大模型を用い、冷却空気流れを可視化(図14)して、冷却空気流れが最適となる流路形状を求めた。また、冷却流路に設ける熱伝達促進フィンの詳細な伝熱特性計測試験等も行った。

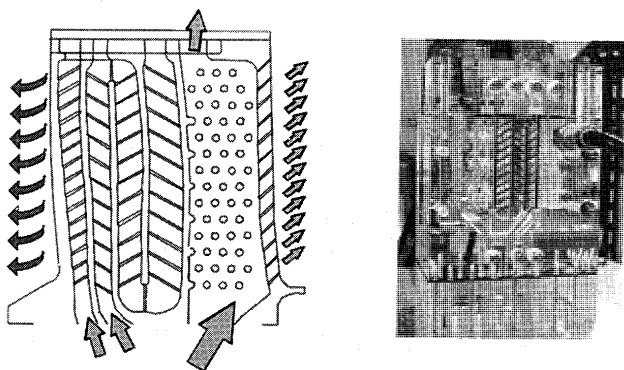


図14 冷却空気流の可視化試験

これらの解析・実験データを基に冷却翼開発を進め、翼面の温度を測定できる高温冷却翼列試験(図15)を行い、その冷却性能を評価し、目標達成の目処を得ている。

#### 4.5 部分負荷性能の改善

3項「要素研究課題」の5)で述べた様に、部分負荷時の熱効率改善を意図して、パワータービンは通常の固定翼タービンの他、初段静翼を可変とした可変翼タービ

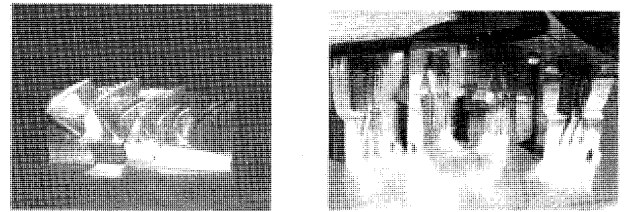


図15 供試冷却翼

ンを開発している。

再生サイクル・ガスタービンでは、部分負荷時の熱交換器入口ガス温度を定格時のレベルに維持することにより、熱交換器での熱回収量の減少を抑えることができ、部分負荷におけるエンジン熱効率を向上させることが可能となる。このためには、部分負荷におけるガス流量の調整が必要であるが、これをパワータービン初段の可変静翼で行う。静翼取り付け角度を変えると翼間の最小面積(スロート面積)が変わり、ガス流量が調整される。

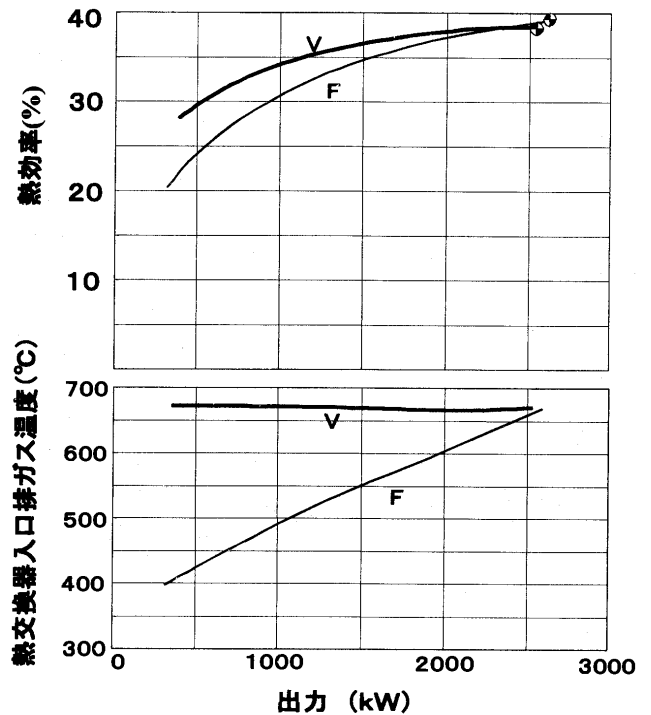


図16 部分負荷性能計算例

課題としては、高温部での可変機構という構造上の問題の他、可変静翼の翼端クリアランスからの漏れ損失という、通常の固定翼タービンでは存在しない性能上の問題がある。この損失量を把握するため、可変静翼の環状翼列試験を行い、クリアランスの大きさと漏れ損失を計測した。この結果は、開発中の可変パワータービンの設計に反映されている。

#### 4.6 船舶搭載技術

上述の研究の他、船用ガスタービン固有の課題として、次の研究をしている。

吸引された海水塩分による各部材の腐食、また、燃料

に含まれる硫黄分等によるタービン翼等高温部材の腐食などが発生する可能性がある。これらに対処するため、塩水噴霧試験と高温腐食試験を行い、各部材の候補材料および防食コーティングの耐食性を評価した。

タービン翼など高温部材の主な腐食原因は、燃料中に含まれる硫黄成分と海塩粒子として吸込まれたNaClで生成される $\text{Na}_2\text{SO}_4$ が付着することによると考えられるが、高温腐食試験では実際のガスタービン燃焼を模擬した高温ガス中での腐食試験により候補材料および防食コーティングしたもの等の耐食性評価(図17)を行った。SMGTの各部材はこの結果を採り入れ選定している。

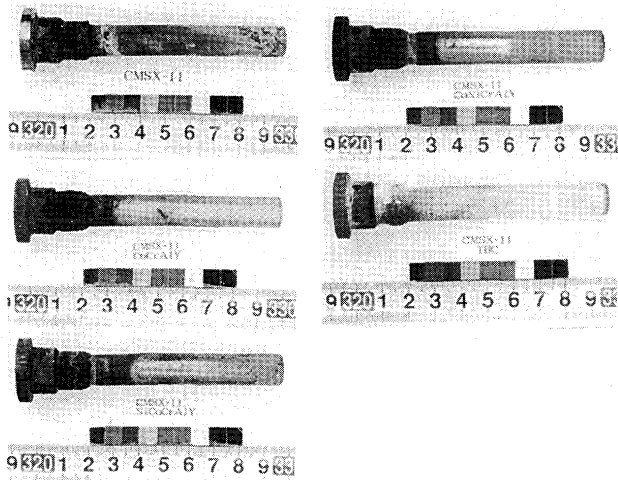


図17 高温腐食試験テストピース(試験後)

この他にも再生2軸式ガスタービンを船用に用いる場合、急激な負荷変動時の過渡応答は重要である。SMGTと推進器系を含めたシミュレーション・モデルを作成し、様々な条件下で過渡応答特性を研究した。さらに、船体動揺がガスタービン各部に与える影響の解析を行った。また、SMGTの運転支援・故障診断システムの開発等

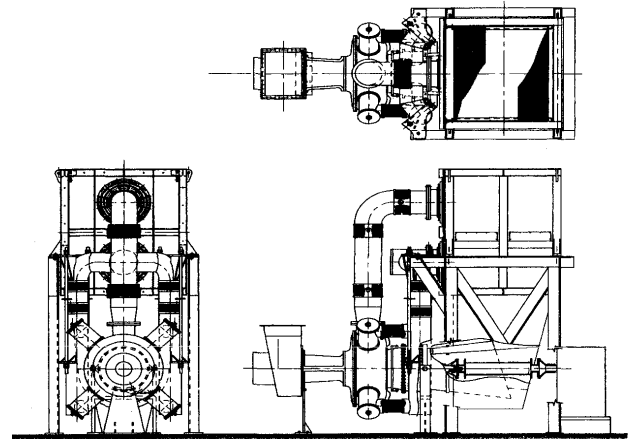


図18 陸上試験機計画図

も行っている。

## 5. おわりに

現在は、ここに紹介した要素研究がほぼ完了する段階にあり、これら研究成果を採り入れた2500 kW級実験機を並行して設計・製作中である。今後は、この実験機による陸上試験により性能評価と改良を重ね開発目標を達成して行く予定である。

なお、本研究開発は、国土交通省、造船業基盤整備事業協会、日本財団のご指導・ご支援を得て実施しています。ここに記して著者一同の謝意を表します。また、関係各位の日頃のご支援に感謝致します。今後とも、引き続きご指導・ご鞭撻頂きます様お願い致します。

## 参考文献

- (1) 田中, 杉本; 日本ガスタービン学会誌, Vol. 27, No. 2(1999. 3), p 82.
- (2) SUGIMOTO, T., et al., Proc. of IGTC '99 (1999.11), p 100.
- (3) SUGIMOTO, T., Proc. of ISME 2000 (2000.10), Vol.1, P -59.

# The Gas Turbine Development in China (中国のガスタービン開発事情)

CAI Ruixian\*<sup>1</sup>  
(蔡 睿賢)

キーワード：ガスタービン (Gas Turbine), 中国 (China), 歴史 (History), 研究開発 (Research and Development), 教育 (Education), 応用 (Application), 製作会社 (Manufacturer)

## 1. Early History and Education of Gas Turbine

Chinese people believe that their forefathers invented the embryonic form gas turbine; it is a very light lantern with a candle under a bladed rotor and can float in the air. However, similar to some other Chinese inventions, it was only a toy and has not yet been developed as industrial machines.

In the forties, some Chinese professors who graduated from advanced industrial countries, began to introduce the gas turbine to China and gave some lectures in famous universities. Among them, Prof. LIANG Shoupan and Prof. CHEN Xuejun (now Chinese Senior Academicians) individually wrote two gas turbine textbooks in China. It is believed that they are the earliest gas turbine books in China.

After the birth of the People's Republic of China, the government centralized all aeronautical departments in China to form two aeronautical institutes (universities) in Beijing and Nanjing. There were military jet engine departments in these two institutes (The author was a student in Beijing at that time).

The first important step to develop industrial gas turbines was to establish a gas turbine speciality and a gas turbine teaching and research group in Power Engineering Department of Tsinghua University in 1956; each year about 30-60 bachelors of gas turbine graduated from this university since 1959. This speciality as well as teaching and research group was proposed and founded by Prof. C. H. Wu (WU Zhonghua) after he came back from the United States. He was famous for his "three-dimensional flow theory of turbomachinery" which was founded by him when he worked in NACA

(now NASA) of the United States. The author was one of the first assistants to help him to teach gas turbine.

At the same time, some other famous engineering universities (for example, Jiaotong University and Harbin Polytechnic University) also began to give gas turbine lectures to their students of steam turbine specialities.

Nowadays, many Chinese universities give gas turbine lectures, courses and training. The most famous universities for gas turbine are probably Tsinghua University, Jiaotong Universities (Xi'an and Shanghai), Harbin Polytechnic University and three chief Aeronautic and Astronautic Universities (located in Beijing, Xi'an and Nanjing).

In these universities, there are many experimental rigs, including plane and annular cascade wind tunnels, rotating single stage and multistage turbine and compressor test rigs, combustion and combustor test rigs, blade cooling experimental equipment, gas turbine test rigs, performance simulators and so forth. Some test equipments are even high speed, high power rigs with advanced surveying instruments such as three-dimensional laser anemometers.

Many Chinese universities and famous institutes educate master and doctor degree students related to gas turbine. It is estimated that every year, about one hundred undergraduate and graduate students related to gas turbine accomplish their studies in China. However, a part of them are not engaged in the work related to Chinese gas turbine after they graduated, for example, they go abroad to find better position.

## 2. Gas Turbine Research

Similarly to other countries, the research work is done in various institutes belonging to different ministries, for example, Machine Building Ministry, Aeronautical Engineering Ministry, Ship Building Ministry as well as the Chinese Academy of Sciences. Now, af-

原稿受付 2001年1月12日

\*1 中国科学院 工程熱物理研究所  
連絡先 蔡 睿賢

〒100080 北京市中関村路乙12号

(2000年10月23日~11月19日の間航技研に国際客員研究官として滞在)

ter the reform of the government, most research institutes become independent enterprises; only a very few research institutes being related to basic research maintain their original position.

The chief research institute mainly related to fundamental study of gas turbine is the Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. She was founded by Prof. C. H. Wu in 1956 also. At that time, her name was Power Lab of the Academy. In 1960, she merged into the Institute of Mechanics and re-established in 1980 with the current name. She has maintained her main working direction onto gas turbine basic research since her establishment although her name was changed twice. Her research topics include engineering thermodynamics and power systems, internal flow aerodynamics (mainly turbomachinery aerodynamics), heat and mass transfer, and combustion. There have been 8 academicians working in this institute; this is an evidence of her achievement in science and technology. Her recent chief achievement is establishing a turbine design system software to improve its performance. Since China has not designed new gas turbine for twenty years, this software was applied to improve the steam turbines designed by China twenty years ago and excellent result was obtained: the efficiency was raised up about 5% on the average of more than thirty units! Some other recent achievements include consideration of unsteady and counter-rotating effects on the turbomachinery performance, comprehensive analyses of various energy systems based on gas turbine such as different types of combined cycles as well as their off-design performances, invention of some new power cycles such as hydrogen-oxygen combined cycle and chemical looping fuel-cell combined cycles, and derivation of some algebraically explicit analytical solutions for unsteady compressible flow, heat and mass transfer as well as part-load performances of power systems.

China has several advanced jet engine research labs, for example, located in Shenyang, Jiangyao, Zhuzhou and Guizhou. They have many powerful advanced test rigs including a high altitude test rig and many transonic rotating test rigs. They have designed and tested some prototype jet engines. However, all these jet engines have not yet been put in practical application and their performances are poorer than the jet engines of advanced industrial countries of the same time. The Shenyang Lab is the oldest one, originally she mainly researched jet engines for the fighters. On the other side, Zhuzhou Lab mainly researched smaller gas

turbines for the turbo-propeller or turbo-shaft engines. Both these two labs have been reforming some jet engines to aeroderivative gas turbines for industry. Jianguo Lab which is located in Sichuan Province and is the largest one, has a high altitude test rig.

China had some research labs for the land-base gas turbines, they belonged to the Ministry of Machine Building. For example, there were institutes of turbines and boilers located in Shanghai, Harbin and Sichuan many years ago where they studied gas turbine also. However, through a lot of changes and reforms, their names have been changed, they become independent enterprises and focus their chief effort on the coal-fired steam power plants and on other more easily profitable projects while the gas turbine research has been only their secondary affair. The only exception is the Nanjing Gas Turbine Lab. She maintains the gas turbine work and the connection with the Nanjing Turbogenerator Factory which is now the only one factory selected by the Ministry of Machine Building as the gas turbine maker. Her main activity is to serve the practical demand, differently from the Institute of Engineering Thermophysics.

There is another Boiler and Turbine Institute which originally belonged to the Ministry of Ship Building. Of course, she chiefly served the marine power. However, recently she has many successful achievements in land-base gas turbines, especially to promote the practical application of gas turbine.

Now, almost all Chinese leaders and employees working in power industry agree that to develop gas turbine is an urgently important task for China. Of course, the research work has to be done in advance.

### 3. Gas Turbine Manufacture

China began gas turbine manufacture in early sixties. Three factories took part in the gas turbine manufacture in that time: Shanghai and Harbin Steam Turbine Works and Nanjing Turbogenerator Factory. They accomplished their gas turbines about the same time. Nanjing Factory successfully manufactured a 1500 kW gas turbine on the basis of design drawing given by the Soviet Union. However, it is a too old design and did not continue to manufacture again. Then, Nanjing Factory designed and manufactured a 1000 kW gas turbine by themselves (cooperating with some Chinese institutes and universities); about ten units of this type gas turbine have been manufactured. Shanghai Steam Turbine Works manufactured 6000 kW class gas turbine as the prime mover of a mobile electrical

power station train; about 10 units have been manufactured also and accomplished many important duties. Harbin Steam Turbine Works designed and manufactured 3000 hp locomotive gas turbine and the locomotive had worked well until late seventies. The same gas turbine design was applied to a standby unit for electrical net also. However, the design level of these gas turbines was not advanced and the turbine inlet temperature did not exceed 700°C. By the way, some small gas turbines were designed and built in the sixties also.

In the seventies, although there was so-called “Cultural Revolution” in China and it disturbed the regular order, the Chinese gas turbine land-base industry still developed. Besides the three main gas turbine manufacturers mentioned above, the fourth-Dongfang Steam Turbine Works located in Sichuan Province took part in the manufacture of gas turbine. She designed and produced a 6 MW class gas turbine with 800°C turbine inlet temperature. Other manufacturers also designed and built new type gas turbines: Nanjing produced several 20 MW class gas turbines; Shanghai developed a new type 6 MW gas turbine and a 20 MW class double shaft gas turbine; Changchun Locomotive Works cooperated with Harbin Steam Turbine Works to develop the Chinese second generation locomotive gas turbine with 4500 hp.

Except the double shaft unit, basically all new units ran successfully, in developing these gas turbines, Chinese scientists and engineers accumulated practical experiences and formed several integrated gas turbine teams and found some new understandings. For example, they found the inner shroud of axial compressors may have serious influence on the aerodynamic performances, especially the surge performance. It is the first discovery of this phenomenon in a practical unit. At that time, the level of Chinese gas turbine laid behind the average world level about 10–15 years.

In the early eighties, due to a decision made by the Premier at that time: “replacing all oil burnt in power station by coal”, gas turbine industry faced a crisis of no fuel, engineers in many well integrated gas turbine teams of works moved to a more profitable market-IPP steam turbine and were gradually out of practice of gas turbine. However, there were still some gas turbine production, especially some aeroderived units.

The Nanjing Turbogenerator Factory has maintained her gas turbine manufacture business. She applied the GE licenses to produce 6000 series gas turbines. Recently, her business is not too bad, and even

has export trade.

#### 4. Gas Turbine Application

China mainland began to utilize land-base gas turbines in early sixties. The first gas turbine for electricity generation was a BBC 6200 kW mobile unit. Then, many domestic units were manufactured and operated in sixties and seventies. They were mainly used for small peak and standby electrical power stations, mobile power stations and locomotives. Commonly they burnt diesel or heavy oil since there were very few natural gas supply at that time. Because of frequent lack of electricity, these units ran often and some of them had been very important equipment in some places.

In the seventies, two projects were planned which would promote a great development of gas turbine. The first one is to construct a long distance (more than 2000 kilometers) pipe line from Sichuan Province to Shanghai to transport natural gas, the second one is to build a railway from Qinghai Province to Tibet. Of course, the prime mover of the natural gas pipe line must be gas turbine; the prime mover of the Qinghai-Tibet railway locomotives would be gas turbine also since the railway elevation is very high (about 5000 m) and there was no any electricity. The Nanjing Turbogenerator Factory and Nanjing Gas Turbine Lab were selected to be the gas turbine center at that time. However, these two projects were postponed later, then the gas turbine development idea was temporarily cancelled also.

As mentioned in the previous paragraph, it was decided in early eighties that the oil was not allowed to use for the power plant, then the application of gas turbine was depressed at that time. However, since the electricity was seriously lacking and the southern coast regions became richer due to the reform, their people urgently needed more electricity to improve their productive activities and daily life, then, they imported oil and gas turbines to solve this problem. Especially in the Delta of Pearl River, many gas turbines and combined cycle power stations have been constructed and operated since late eighties.

However, most units were imported from different gas turbine makers. In other words, almost all important gas turbine manufacturers in the world have installed their own gas turbines in China mainland, the highest capacity of a single gas turbine unit (excluding steam turbine capacity in a combined cycle) is about 100 MW class.

Recently, there are two new points that will promote the gas turbine development in China. The first one is the consideration of environment since the coal fired equipments introduce serious pollution. The second one is that Chinese Government decides to develop the western region of China and to construct a more than 4000 km length pipe line for transporting natural gas produced in the western region or imported from north-western neighbors to the eastern region. It seems that there will be a lot of gas turbine business in China. Recently, the installed capacity of Chinese land-base gas turbines is about several GW, about only 1-2% of the total electrical power plant capacity. There is a great possibility to develop gas turbines and combined cycles.

In addition, since coal will still be the main energy source in China, Chinese Government decides to develop coal fired combined cycles also. It has been determined to build an IGCC power plant in Yantai in Shandong Province to burn high sulphur coal, the ca-

capacity class is several 100 MW. A PFBC power plant is planned also, the capacity is about 100 MW, perhaps it will be located in the north-eastern region. Of course, nowadays the main parts of IGCC or PFBC, especially the gas turbine, can only be imported from advanced industrial countries. However, China plans to take part in the development of coal fired combined cycles step by step.

## 5. Prospect

The gas turbine development of China is along a rugged and tortuous path. However, the prospect is bright. For a developing country as China, she has to learn from and cooperate with other countries, especially in the globalized new millennium. However, China is a large country, she can not totally depend on other countries. For developing gas turbine in China, it needs the effort of Chinese managers, scientists and engineers as well as the help and cooperation of other countries.

# 水素燃焼雰囲気下における ガスタービン単結晶翼の高温酸化挙動

## High Temperature Steam Oxidation Behaviors of Ni-base Single Crystal Alloy CMSX-4 for Gas Turbine Rotor Blades

吉岡 洋明\*<sup>1</sup>  
YOSHIOKA Yomei

日野 武久\*<sup>1</sup>  
HINO Takehisa

閻 梁\*<sup>1</sup>  
YAN Liang

稲垣 修一\*<sup>1</sup>  
INAGAKI Syuichi

岡村 隆成\*<sup>1</sup>  
OKAMURA Takanari

キーワード：Hydrogen Combustion, Gas Turbine, Rotor Blade, Steam Oxidation,  
Single Crystal Alloy, Thermal Barrier Coating, Aluminizing

### Abstract

As one of the elemental tests for the development of 1700°C class hydrogen fueled combustion turbine system under the World Energy Network (WE-NET) program, high temperature oxidation behaviors of single crystal (SC) alloy CMSX-4 and thermal barrier coating (TBC) were conducted at the temperature of 600°–1000°C in the air and steam environments. Comparable weight gains due to the oxidation in the air and steam were observed at 1000°C, but below this temperature maximum weight gain was observed at 800°C in the steam whereas that in the air continuously decreased as the test temperature decreased. The scale model SC rotor blade with TBC which was tested in the hydrogen-oxygen combustion wind tunnel with practical steam condition of 1700°C (max.) and 2.44 MPa for 186 min were destructively evaluated, the result of which showed no symptom of steam oxidation due to increase of metal temperature over the designed one.

### 1. まえがき

通産省のニューサンシャイン計画の一環として行われた WE-NET (World Energy Network) では、クリーンなエネルギーである水素を利用した 1700°C 級ガスタービンの開発が行われている。ここでは、500 MW のプラントを目指した設計上の要素技術の確立を意図しており、1998 年度までの第一期計画では、最終的に秋田県田代試験場における 1700°C の水素燃焼ガス高温風洞試験による翼列検証までの設計と縮小モデルの試作を行い、検証試験を終了している。

この中では、冷却翼の設計および Ni 基単結晶合金の評価とセラミックス遮熱コーティング (TBC: Thermal Barrier Coating) の開発を行うと共に、燃焼ガスおよび冷却媒体が水蒸気であることから、水蒸気環境下における合金およびコーティング層の酸化特性の評価、具体的には本ガスタービンの初段動・静翼候補単結晶合金 CMSX 4 および TBC の水蒸気環境下における酸化挙動

およびその機械的性質に及ぼす効果の基礎的評価を行った。

また、田代試験場での翼列検証試験に用いた動翼を切断調査し、ラボ試験に見られる現象から推察した本試験翼の劣化・損傷の解析も行い、設計仕様を満たす冷却・遮熱性能が得られ、水蒸気酸化等が生じなかったことの確認も行ったので、ここに報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 ラボ試験

##### (1) 供試材

試験片素材は  $\phi 13.5 \times 100$  mm の丸棒に鋳造した後、 $\phi 13.5 \times 20$  mm の丸棒試験片あるいは  $10 \times 20 \times 2$  mm のクーポン試験片を切り出し、全面を鏡面仕上げし試験に供した。また、一部の試験片には、アルミナイズ処理あるいは TBC を施し試験に供した。アルミナイズ処理は、Al/Fe 粉末と  $Al_2O_3$  の混合粉末に  $NH_4Cl$  を添加した Al パック粉末中に試験片を挿入し、水素雰囲気中で加熱し約 30~40  $\mu m$  のアルミナイズ層を形成させた。TBC コーティングは、丸棒の側面に真空プラズマ溶射 (VPS: Vacuum Plasma Spray) により約 150  $\mu m$  のボンド層

原稿受付 2000 年 2 月 10 日

\* 1 ㈱東芝 電力システム社 電力産業システム技術開発センター  
〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-4



をコーティングした後、電子ビーム物理蒸着(EB-PVD: Electron Beam Physical Vapor Deposition)にて約200 μmのTBCを施し試験に供した。各々の供試材の化学組成を表1に示す。

(2) 水蒸気酸化試験

水蒸気酸化試験に供する試験装置の系統図を図1に示す。試験装置は大きくテストセクションと蒸気発生装置からなり、前者は横型管状電気炉と蒸気通路部を出入り口を除き密封した内径100 mmのステンレス製反応筒からなる。後者は高純度のArガスをバブリングし十分に脱気した純水を約200℃で加熱した蒸気発生器に滴下し、発生した蒸気の体積膨張を駆動力とし上記反応筒中に流入させる方式を採用した。

試験温度は、動翼の内外表面のメタル温度を想定し600~1000℃とし電気炉にて制御した。100 h, 200 h, 300 h, 500 hの曝露試験後、試験片の質量および外観の性状の経時変化を調査すると共に、所定時間経過後に切断調査を行い断面組織観察および生成酸化被膜の分析を行った。

表1 供試材

	Ni	Cr	Co	Fe	Mo	W	Al	Ti	Ta	Re	Hf	Y
CMSX4	Bal.	6.5	9.0	-	0.6	6.0	5.6	1.0	6.50	3.0	0.1	-
TBC						ZrO <sub>2</sub> /8%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Bond coating	Bal.	17.0	23.0	-	-	-	12.5	-	-	-	-	0.5

表2 水素燃焼翼列試験の仕様<sup>(1)</sup>

		Rotor blade
Main flow	Inlet mean temp.	1570℃
	Inlet max. temp.	1641℃
	Inlet pressure	2.44 MPa
Cooling flow	Inlet temp.	350℃
	Inlet pressure	3.63 MPa
Materials	Substrate	CMSX4
	Coating	TBC / Bond coating

(3) 予水蒸気酸化試験片の機械試験

水蒸気酸化の機械特性に及ぼす効果を確認するため、水蒸気中および大気中で900℃、500 hの曝露試験を行った後、クリープ試験は、900℃、392 MPaの条件で、低サイクル試験は、900℃、全ひずみ範囲2%、ひずみ速度0.1%/sで行った。クリープ試験は、平行部径6.0 mm、評点間距離30 mmのつば付き試験片を、低サイクル試験は平行部径6.35 mm、平行部長25.4 mmの試験片を用いた。

2.2 水素燃焼翼列試験

水素燃焼タービンの翼列試験および動翼の材料の仕様を表2に示す。水素・酸素燃焼条件下で1000~1200℃で113 min., 1200~1500℃で41 min., 1500~1640℃で10 min., 定格の1640℃で22 min., 合計186 min.の試験計測を行った。

試験後、翼有効部長の50%スパンの部位で翼長方向に垂直な断面で切断し、組織観察を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 ラボ試験

3.1.1 水蒸気酸化試験

500~1000℃で500 hまでの水蒸気酸化試験結果を、800~1000℃の大気酸化試験の結果とあわせて図2に示

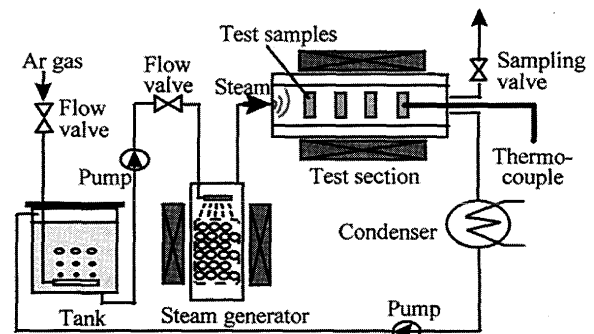


図1 水蒸気酸化試験装置系統図

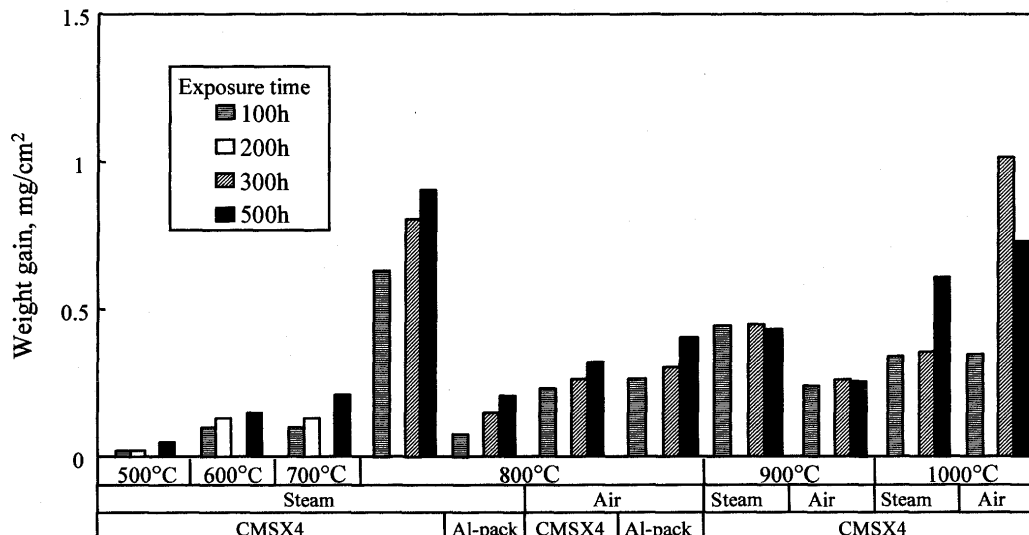


図2 CMSX4 無垢材とアルミナイズ処理材の水蒸気と大気中における酸化試験結果

す。大気中においては、試験温度が高くなるに従い酸化による重量増は大きくなる傾向が見られたのに対し、水蒸気中では、800℃にて最も重量増は大きくなる傾向が認められた。なお、水蒸気による酸化の加速傾向は、1000℃では認められないのに対し、900℃以下では認められており、酸化増量の最も大きかった800℃で最も顕著な差違が認められた。

この顕著な差違の認められた800℃の試験では、アルミナイズ処理材の評価も行ったが、ここでは大気中の酸化量の方が逆に大きくなる結果を示しており、水蒸気による加速酸化の傾向は認められなかった。

図3にTBCを施した試験片を用い900℃と1000℃で行った酸化試験の結果を示す。ここでもCMSX 4と同様1000℃ではほぼ同等の酸化量を示したが、900℃においては水蒸気中の方が酸化増量は大きくなる傾向が認められた。

図4に800℃、500 hの酸化試験後の断面組織観察結果を示す。いずれの酸化スケールも、外層スケールと内層スケールの2層構造を示しており、大気中ではその2

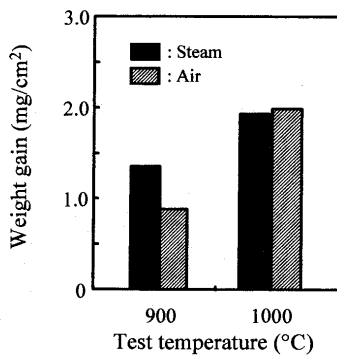


図3 TBCの水蒸気中及び大気中酸化試験結果

層が均一であるのに対し(図4(a)),水蒸気中では内外層スケール共厚く、かつ、内層スケールは不均一な酸化形態を示し、また、内部酸化も生じていた(図4(b))。しかし、アルミナイズ処理を施した試験片は、緻密な酸化スケールを形成しており、水蒸気によるスケールの形態の変化は認められなかった(図4(c))。

図5に、各酸化試験後の試験片の断面組織のEPMAによる各構成元素の面分析結果を示す。800℃の大気中では外層スケール中はCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>主体にTiO<sub>2</sub>が認められたが、内層スケール中にはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主体にNiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、NiTa<sub>2</sub>O<sub>6</sub>等の、成長の遅い保護性に富んだ保護スケールが酸化の初期から均質に生成し、以後安定に表面を覆っていた。これに対して、水蒸気中ではCo、Ni、特にNiの外方拡散による保護性の劣るNiOスケールの生成と成長が顕著に認められた。また、内層スケールは酸素の内方拡散によるCr、Al、Ti、Taの複合型の酸化皮膜が生成していた。

なお、水蒸気中ではNiO外層スケールの顕著な成長

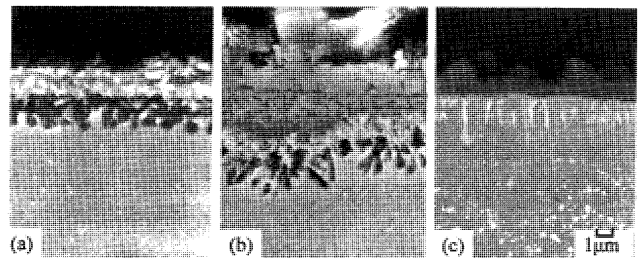


図4 無垢のCMSX 4の大気中(a)と水蒸気中(b)で800℃、500 h酸化試験後の、また、アルミナイズ処理を施したCMSX 4の水蒸気中(c)で800℃、500 hの酸化試験後の断面組織観察結果

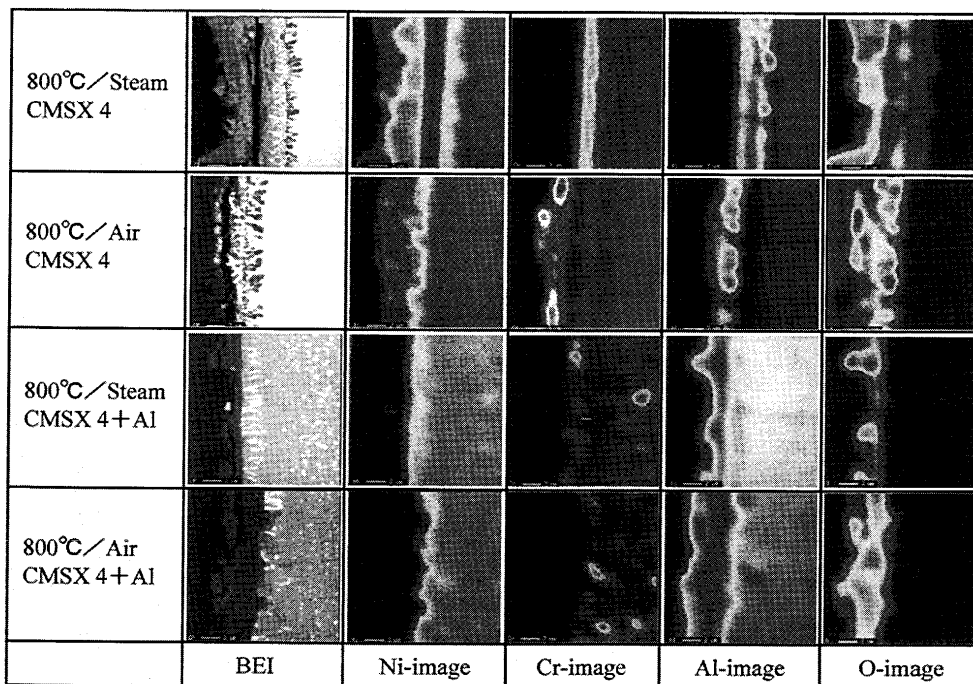


図5 800℃ 蒸気中および大気中500 h酸化試験後のCMSX 4およびそのアルミナイズ材の断面EPMA面分析結果

とともに内層スケールの不均質な生成が認められている。水蒸気中では、酸化の初期に均質に生成した酸化スケールは、不安定で酸化のごく初期にしか認められず、スケールは破れ保護性に劣る酸化皮膜が生成し、不均一な形態を示したものと考えられる。また、本単結晶合金は、偏析しやすく耐酸化性に劣る Re 等の高融点金属を多量に含有していることから、保護性に富んだ皮膜形成ができない場合、その偏析に応じた不均質な酸化形態を取りやすいことも、この不均質さを生じた大きな要因と考えられる。

Al パック材は、外層スケール中に Al の濃化が顕著に認められたが他の元素の濃化は認められず、また、内層スケールの形成も認められなかった。保護性の高い  $Al_2O_3$  系の酸化皮膜が形成されたものと考えられる。

図 6 に 1000℃、500 h の断面組織観察結果を示す。1000℃では、試験後の冷却過程で酸化スケールの大半が剥離しており、このため限られた少ない残存部位で観察を行った。この結果、大気中では外層スケールの成長が顕著であり、内層スケールはコラムあるいはブロック状に形成されていた。これに対して、水蒸気中では、内層スケールは外層スケールとほぼ同じ厚さで形成されていた。また、水蒸気中の内外層スケールには多数の欠陥が認められた。なお、スケールの剥離は、大気中では外層スケール内で発生しているのに対し、水蒸気中では、内層スケールと基材との界面で生じていた。このため、残存スケール部での比較では、水蒸気中の方が酸化量は多く認められているが、剥離したものを含めた酸化量は、

ほぼ同等であったものと考えられる。

図 7 に 1000℃における各酸化試験後の試験片断面組織の EPMA による各構成元素の面分析結果を示す。1000℃においても、大気中では外層スケールは Cr, Co, Ni, Ta, 特に, Cr の濃化が認められており、保護性に乏しい  $Cr_2O_3/NiCr_2O_4$  であった。内層スケールは Al の濃化は認められたがコラム状あるいはブロック状で、皮膜は形成していなかった。これに対して水蒸気中では、外層スケールでは Ni の濃化が認められており、内層スケールでは最外層に Cr, Co, W, 次いで Ta の濃化が認められた。外層スケールは  $NiO$ 、内層スケールは、保護性に乏しい  $(Ni, Co)Cr_2O_4/NiWO_4$  であり、多数の欠陥の認められた部分は Ta の酸化物であった。これらのことから、大気中と水蒸気中のいずれにおいても 1000℃では保護性に優れた酸化スケールは形成されておらず、このため形態は異なるがほぼ同等の酸化増量となったものと考えられる。

TBC 材の試験片は、CMSX 4 無垢材と同様、900℃の酸化試験では、TBC 層とボンド層の界面の酸化スケールは大気試験では均一、水蒸気中では不均一であったが、1000℃では、水蒸気中と大気中で酸化層厚さに有意差はなく、ほぼ同等の酸化量を示していた。しかし、EPMA による元素分析の結果、TBC コーティング材のボンド層の酸化は、900℃、1000℃いずれも Al と酸素の強い濃化が認められたことから、 $Al_2O_3$  の酸化皮膜が形成されていたと考えられる。

### 3.1.2 水蒸気予酸化材の機械試験

900℃で 500 h の曝露試験を行った後、900℃、392 MPa のクリープ試験および 900℃、全ひずみ範囲 2%、ひずみ速度 0.1%/s の低サイクル試験結果を図 8 および図 9 に示す。水蒸気予酸化材のクリープ寿命、伸び、絞りおよび低サイクル疲労強度は、大気中の予酸化材とほぼ同等であり、水蒸気による特性の低下は今回の 500 h の予酸化材においては認められなかった。今回の予酸化条件では蒸気中と大気中で内層スケール厚さに有意差はなく断面積低下の差は無視できること、また、酸化皮膜の形態が特に蒸気中においては層状であり、き裂状の酸化形態が生じていなかったことによるものと考えられる。

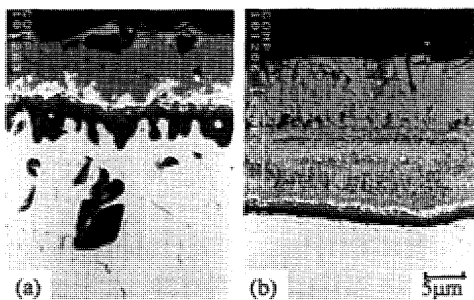


図 6 CMSX 4 無垢材の大気中(a)と水蒸気中(b)で 1000℃、500 h 後の断面組織観察結果

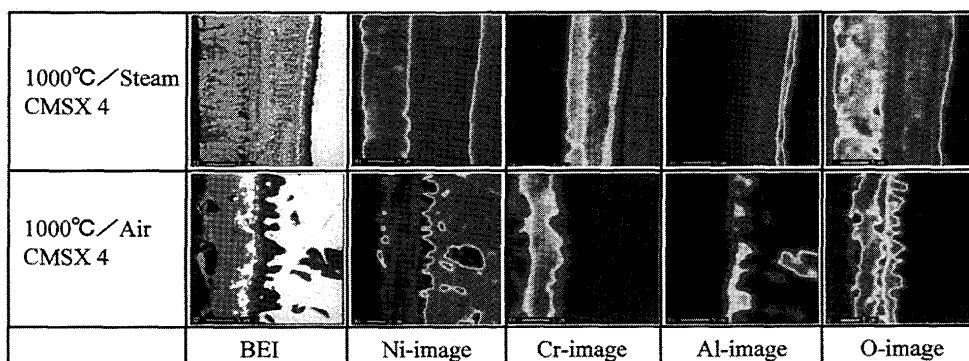


図 7 1000℃ 蒸気中および大気中 500 h 酸化試験後の断面 EPMA 面分析結果

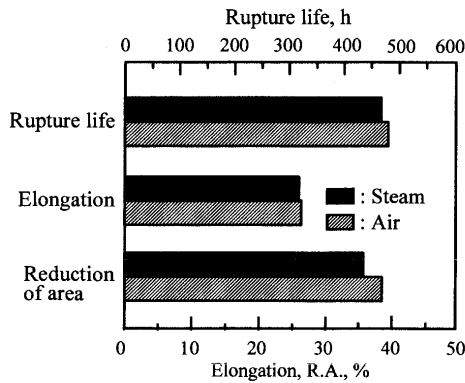


図8 900°C, 500 h 予酸化後のクリープ試験結果 (900°C, 392 MPa)

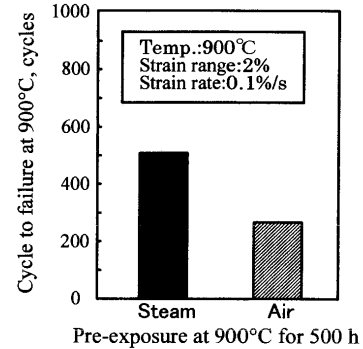


図9 900°C, 500 h 予酸化後のLCF試験結果

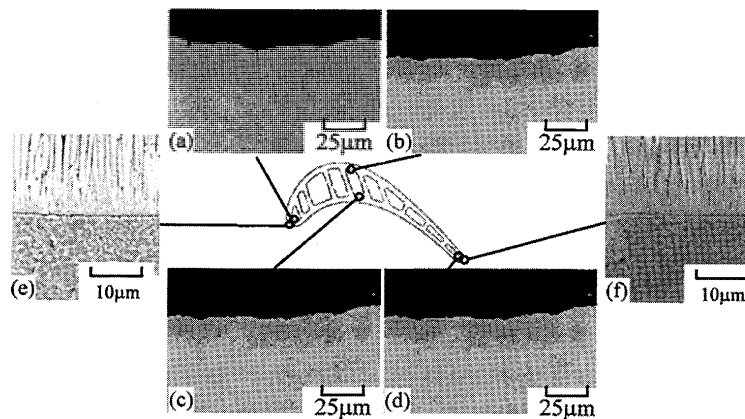


図10 水素燃焼タービンの翼列試験後の翼有効部長の50% スパン部位の冷却孔内面 (a~d) および外表面 TBC (e, f) の組織観察結果

### 3.2 水素燃焼翼列試験

水素燃焼タービンの翼列試験後、翼有効部長の50% スパンの部位で翼長方向に垂直な断面で切断し、組織観察を実施した結果を図10に示す。冷却孔内面および外表面のTBCボンド層界面に酸化はほとんど認められなかった。このため、十分に冷却および遮熱がなされており、設計仕様を超える過昇温は生じておらず、今回の運転時間において水蒸気酸化が生じるまでの温度には上がっていなかったものと考えられる。

### 4. 結論

高温水蒸気中および大気中における酸化試験の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 800°Cでの酸化試験の結果、水蒸気による酸化の加速が顕著に認められた。大気中では保護性に優れた $Al_2O_3$ の内層スケールが均一に形成されたのに対し、水蒸気中では保護性に乏しい外層スケール $NiO$ の形成と、不均一な内層スケールの形成が認められた。
- (2) 1000°Cでは、大気中では外層スケールの形成が顕

著であったのに対し、水蒸気中では内層スケールが外層スケールとほぼ同等に形成していた。しかし、いずれにおいても保護性に優れた酸化皮膜は形成されておらず、酸化量に有意差は認められなかった。

- (3) 水蒸気酸化のクリープあるいは低サイクル疲労寿命への影響は、900°C, 500 hの予酸化試験片を用いた試験に関する限り認められなかった。

今後更に長時間のデータを採取し酸化機構の解明を行うと共に、データベースの構築を図って行きたい。

### 謝辞

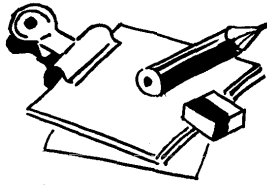
本研究は財団法人発電設備技術検査協会を通して、NEDOからの委託で実施した。両機関の研究への支援に対してここに深く感謝の意を表す。

### 参考文献

- (1) 岡村隆成, 川岸裕之, 古閑明紀, 伊藤勝康, 機械学会 1999 年度年次大会予稿集



♡ガスタービンを100倍面白くできるか♡



## ガスタービンと教育・研究問題

高原 北雄\*<sup>1</sup>  
TAKAHARA Kitao

### 1. はじめに

ガスタービンの周辺には百貨店のように百科の技術が満ちている。ガスタービン開発者はその幅広い多くの技術を統合し実社会に貢献できる機械仕事を、環境負荷が少なく、また効率よく、安価にガスタービンを提供することが要請されている。しかし大学では個々の学問に分割して教えてきたが、物造りで大切な技術の統合化について殆ど教えてこなかった。特にガスタービンが成熟しつつある今、工学についての多様な視点からの技術哲学が必要になっている。

人類史から見ると今や技術文化時代に入っている。指導的な技術者は宇宙船「地球号」の船長さんのように現実社会の中で多くの技術を組織化し組立てる優れた能力を必要としている。そのためには狭い専門領域を越えた総合技術を扱える文化人として育てる必要がある。その指導的な技術者を育てるためにはまず優れた教育・研究制度を根本から考え直す時代を迎えているのではないだろうか。

### 2. 工学部は工学的理学部なのか

私達の日本の社会は家庭や社会の実生活から学ぶシステムを壊してきた。その一方で小学校から大学までの授業は教科書を利用して長年学んできたが、学校では試験の採点を簡便にするために「単純・平均化して答が一つ」の「染脳」を16年間受け続けてきた。その弊害として工学でも創造性を発揮できる人材が少なくなってきたようだ。しかし現実社会では単純・平均化してはいけな複雑な状況が増え、多くの影響因子を考慮せざるを得ない変化が生まれてきている。大学では創作的な研究を指導しておられる方は多いが、学生達にガスタービン部品を介してその中で起こっている物理現象を判り易く理解させ論理式と共に、複雑な技術をイメージできるように教えている教官は少ないように私には感じている。ガスタービンの中で起こる物理現象と共に構造や部品を介して教わると具体的な現象の理解が深まり新しい創作が生まれてくるように感じている。

話は少し飛ぶが、私は集中講義の休み時間に学生達に

終戦直後に流行した電気パンを作って一緒に食べることもある。木製の箱に入れた電源コード付銅板2枚の間に塩分と重曹が入ったパン生地を流し込み電源を入れれば約10分で美味しいパンができる。これはパン生地に適度な電気抵抗があり電気が流れて発熱するという単純な物理現象を利用したものだ。単に電気の物理現象を式で習っただけではこのようなパン焼器を創作できないようだ。学生達は「目から鱗」のように物理現象を納得し物造りの技術工学の本質が伝わるようだ。物理と式と工学の意味を改めて考えてもらうために時々私は電気パンの実演・試食をさせている。

同じようにガスタービンも「始めに式ありき」で教えているのはガスタービンの具体的なイメージが定まらず、試験が終わると直ぐに忘れ、創作的な新製品に結びつき難いようだ。そのためか、多くの社会人と話をすると「学校で習ったことは就職してから使ったことがない」と情けなそうに話される方に何度もお目にかかっている。私はその都度悲しい思いをしてきた。このような教育ではそのうち高等教育が瓦解するのではと心配している。可能な限り抽象的な物理現象を日常生活の中で興味を引く形にして考えさせる教育が子供時代から必要であると私は考え続けている。目の前に学生を呼びつけながら視聴覚を主にしたバーチャルな従来の授業を今後も続けていければ大学の存在価値が激減し学生は魅力を失うだろう。この結果、学生は視聴覚を主柱にした放送大学やインターネット大学に転校してゆく可能性を秘めている。今や大学の冬の時代を迎える状況が生まれつつあるようだ。そのため工学部の授業を楽しく楽に「楽修」させる準備を早く進めないと「目前大学」に学生が集まらない時代になりそうだ。その対策としては工学部では技術製品の環境条件を考えながら学生達に実物を介して教えれば具体的にイメージしやすく、「我苦愁」でない「楽修」の授業になる。

そのために私は可能な限り実物や模型を使い肌で感じさせる楽しい授業を心がけている。文系の授業は主として視聴覚だけでも良いのかも知れないが、物作りのための技術や工学は料理と同じく視聴覚を越えた体験学習が極めて大切だ。どちらにしろガスタービンを含めた工学教育の本質を改めて考える時代を迎えているようだ。

原稿受付 2001年1月24日

\*1 高原総合研究所

〒206-0803 東京都稲城市向陽台4-2-B-809

### 3. 学校教育

旧文部省が進めてきた新しい学習指導要領は「ゆとり」路線で授業内容の3割程度を削減する規定路線を走っており学力低下は避けられないだろう。大学は2006年の大学入試から直面することになる。わが国民の学力低下から日本の将来を技術立国を旨とする産業界では大変心配しているようだ。本来の教育は家庭教育・社会教育・学校教育の3本柱で支える必要がある。しかし、日本社会の現状では家庭や社会で過ごす時間は多いにも拘らず、「学校への丸投げ教育」が行われている。その根本を改善せずに文部科学省が「ゆとり教育」として学校での「ゆとり」を標榜しても逆効果になるのではないだろうか。

2001年1月17日の朝日新聞夕刊の「理科離れを探る2」を読むと国立教育政策研究所の95年の調査で「理科好きの割合は国際平均並み、算数好きは国際的に低位だがどちらも中学校で好きという割合が低下」とある。またある大学教授のコメントでは「好きでもないし、大切とも思わないけど今はただ、試験のためにやるしかない、ましてや将来科学を仕事にしたいくないというのが日本の子供の姿なのです」との記事もあった。これでは理科や数学を記号としてコンピュータのように事務的に処理する能力を覚えても効果は少ないのではないだろうか。私達はコンピュータを駆使して物理現象や現象を総合的に理解し日常生活で使えるような授業内容に変えるべきではないだろうか。このように時代と共に少しずつ、生活実感から離れた教育環境が生まれてきていると不安に駆られている。

### 4. ガスタービン社会で以前から私が気になっていた問題

#### 4.1 翼列中に挿入して測定する装置

円柱の形状をした温度や圧力を測る熱電対やピトー管は校正風洞内の平行流中で検定している。5孔ピトー管の圧力分布からも判るように平行流中でも測定器の支持円柱のため偏向していることが判る。その円柱形状をした測定器を剥離しやすい広がり通路の高負荷の圧縮機や狭まり通路の高負荷タービンの翼列内に差込んで測定している。前回にも述べたように細い円柱でも圧力損失は極めて大きいことを指摘したように棒状の計測装置は流れを大きく乱し、計測器の挿入前の流れを測定しようとする校正法には疑問点が多いと考えている。翼列通路に比べて比較的大きな円柱の測定器を挿入して流れを乱しながら得たデータは挿入前の真値と大きく違う可能性を秘めている。

#### 4.2 伝熱問題

熱伝達・熱伝導・輻射の物理現象を数式で取り扱っているが具体的な物理面でのイメージを大切しておく必要がある。私は小学生の頃から高校卒業まで家庭の五右衛門風呂を沸かし続けてきた。燃料は枝葉や近隣で拾ってきたゴミを沸していたが毎回2時間も火加減を見てい

た。何とか1時間で沸かし1時間は遊びたいと考え、中学時代に図書館に行き、伝熱の本を読んだが良い知恵は出なかった。ゴミを燃やしながら、何故ゴミが燃えるのか、高温ガスが輻射や対流でなぜ風呂釜に熱を伝えるのか、鉄釜がなぜ外から内側に向かって熱を伝えるのか、なぜ厚い鉄釜を通して水をお湯に変えるのかなどを考え続けていた。その頃から漠然とガス体や鉄の分子が振動して相手にエネルギーを爆弾のように伝えているイメージを持っていた。また料理中に味噌汁が対流を起こすのを目の当たりすることで更にイメージは膨らんできた。大学で伝熱工学を習うようになってより鮮明に熱の移動のイメージが湧き、式と熱伝達係数の不確かさを感じるようになった。今の学生達は日常生活で起こる現象を実践することが少なく、伝熱工学を数式の授業だけで教わっても物理現象を十分に理解ができないのではと危惧している。

#### 4.3 流量測定

ガスタービン要素の試験で流量をオリフィス流量計やピトー管で測定するが、一般に教科書や日本工業規格のJIS規格に則って扱っている。そのオリフィス流量計の精度はあまり高くなく流量係数は2桁しかない。以前にも書いたようにパソコンの中でデータ処理時に何時しか有効桁数は増え、2桁しかないことを忘れた論理展開をしている論文も散見される。このような無駄な試験をしないため、透明なアクリル樹脂製の管路の中にオリフィス流量計を組み込み、外から見えるようにして実験をさせ、校正法の歴史的な背景と有効数字を意識させる実習をすべきと考えている。

また日本ガスタービン学会でもオリフィス流量計の再吟味委員会を作り、サイズの違う多くのオリフィス管を造り、並列・直列に並べ、流量一定の基準で再実験を試みるのも面白いのではないだろうか。

#### 4.4 風洞の動翼破損の意味

ある時、大学の風洞の動翼に割れが見つかり半年ほど運転禁止になっていた。私に意見を求めてきたので、翼の遠心応力を算出してみるとターボチャージャーの数百分の1と低く、肉厚の翼弦中央に半径方向の割れが全ての動翼にあった。このような割れでは動翼が破損しないと判断し現状のまま運転を再開してもよいと具申したことがあった。しかしメーカー側は納得せず仕方なくX線写真を撮ってもらった。その結果、動翼製造時に凝固時間を短くして結晶粒が大きくしないように冷し金を使っていたことが判った。その周囲に巻いた針金の先端からの割れと判明した。30年以上も前の動翼製造時の割れと判り、メーカーも納得し何の修理もせずに今も運転されている。

このような事件からメーカーや大学や研究所の現場で総合的な技術判断ができなくなりつつあることを感じている。将来IT時代の到来で現場の技術に関心が向かなくなるのではと大変不安を感じている。

### 5. これからの工学教育は

大学の教官は教育者であるだけでなく研究者として努力をされている。しかし学生から見ると先生は教育に使う時間より、研究に使う時間のほうが多く授業がマンネリ化しているように写っているようだ。大学4年間は約3.5万時間だが、その間の総授業時間数は約5%の約1600時間程度と少ない。工学部での授業は記号のような数学を用い実感を伴いにくい授業が多く、視聴覚を越えた実験・実習を含む授業時間数は次第に減少しているようだ。

わが国の18歳人口は今から10年前、200万人/年を越えていたが、今は170万人/年と聞いている。現在生まれている赤ちゃんは120万人/年という少子高齢化時代を迎えて大学冬の時代に入っている。また現在公表されている赤字財政で国民一人当たり500万円にもなっているが、特別会計には更なる赤字が隠されている可能性がある。このまま行けば福祉厚生予算や環境予算が急増中で国立大学の予算も切り詰められる可能性が高い。この一方で大学は独立法人化が進みIT時代を迎えると「目の前大学」の存亡が大きく問われる時代になっている。

## ▷ 入会者名簿 ◁

[正会員] 天 野 孝 一 ( I H I ) [学生会員から正会員] 大 谷 浄 (ヤンマーディーゼル)  
北 垣 壽 (大阪冶金興業) 藤 田 邦 夫 (石 垣) 竹 内 寛 ( I H I ) 岡 本 泰 雄 (いすゞ自動車)

## ○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第29回可視化情報シンポジウム	H 13/7/17-19 工学院大学 (新宿校舎)	可視化情報学会 TEL: 03-5993-5020 FAX: 03-5993-5026
日本流体力学会年会 2001—流体力学における20世紀の総括と21世紀の展望—	H 13/7/31-8/2 工学院大学 (新宿校舎)	日本流体力学会 TEL: 03-3714-0427 FAX: 03-3714-0424

## ◇ 平成13年度会費納入のお願い ◇

平成13年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、平成13年3月23日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員 1口 70,000円  
正会員 5,000円  
学生会員 2,500円

郵便為替	00170-9-179578
銀行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座 1703707
いずれも口座名は(株)日本ガスタービン学会です。	

※かねてより会費自動振替のご協力をお願いしておりますが、未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上、事務局宛お送り下さい。自動振替をご利用されますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願い致します。

### 5. これからの工学教育は

大学の教官は教育者であるだけでなく研究者として努力をされている。しかし学生から見ると先生は教育に使う時間より、研究に使う時間のほうが多く授業がマンネリ化しているように写っているようだ。大学4年間は約3.5万時間だが、その間の総授業時間数は約5%の約1600時間程度と少ない。工学部での授業は記号のような数学を用い実感を伴いにくい授業が多く、視聴覚を越えた実験・実習を含む授業時間数は次第に減少しているようだ。

わが国の18歳人口は今から10年前、200万人/年を越えていたが、今は170万人/年と聞いている。現在生まれている赤ちゃんは120万人/年という少子高齢化時代を迎えて大学冬の時代に入っている。また現在公表されている赤字財政で国民一人当たり500万円にもなっているが、特別会計には更なる赤字が隠されている可能性がある。このまま行けば福祉厚生予算や環境予算が急増中で国立大学の予算も切り詰められる可能性が高い。この一方で大学は独立法人化が進みIT時代を迎えると「目の前大学」の存亡が大きく問われる時代になっている。

## ▷ 入会者名簿 ◁

[正会員] 天 野 孝 一 ( I H I ) [学生会員から正会員] 大 谷 浄 (ヤンマーディーゼル)  
北 垣 壽 (大阪冶金興業) 藤 田 邦 夫 (石 垣) 竹 内 寛 ( I H I ) 岡 本 泰 雄 (いすゞ自動車)

## ○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第29回可視化情報シンポジウム	H 13/7/17-19 工学院大学 (新宿校舎)	可視化情報学会 TEL: 03-5993-5020 FAX: 03-5993-5026
日本流体力学会年会 2001—流体力学における20世紀の総括と21世紀の展望—	H 13/7/31-8/2 工学院大学 (新宿校舎)	日本流体力学会 TEL: 03-3714-0427 FAX: 03-3714-0424

## ◇ 平成13年度会費納入のお願い ◇

平成13年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、平成13年3月23日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員 1口 70,000円  
正会員 5,000円  
学生会員 2,500円

郵便為替	00170-9-179578
銀行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座 1703707
いずれも口座名は(株)日本ガスタービン学会です。	

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが、未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上、事務局宛お送り下さい。自動振替をご利用されますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願い致します。



### 5. これからの工学教育は

大学の教官は教育者であるだけでなく研究者として努力をされている。しかし学生から見ると先生は教育に使う時間より、研究に使う時間のほうが多く授業がマンネリ化しているように写っているようだ。大学4年間は約3.5万時間だが、その間の総授業時間数は約5%の約1600時間程度と少ない。工学部での授業は記号のような数学を用い実感を伴いにくい授業が多く、視聴覚を越えた実験・実習を含む授業時間数は次第に減少しているようだ。

わが国の18歳人口は今から10年前、200万人/年を越えていたが、今は170万人/年と聞いている。現在生まれている赤ちゃんは120万人/年という少子高齢化時代を迎えて大学冬の時代に入っている。また現在公表されている赤字財政で国民一人当たり500万円にもなっているが、特別会計には更なる赤字が隠されている可能性がある。このまま行けば福祉厚生予算や環境予算が急増中で国立大学の予算も切り詰められる可能性が高い。この一方で大学は独立法人化が進みIT時代を迎えると「目の前大学」の存亡が大きく問われる時代になっている。

## ▷ 入会者名簿 ◁

[正会員] 天 野 孝 一 ( I H I ) [学生会員から正会員] 大 谷 浄 (ヤンマーディーゼル)  
北 垣 壽 (大阪冶金興業) 藤 田 邦 夫 (石 垣) 竹 内 寛 ( I H I ) 岡 本 泰 雄 (いすゞ自動車)

## ○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第29回可視化情報シンポジウム	H 13/7/17-19 工学院大学 (新宿校舎)	可視化情報学会 TEL: 03-5993-5020 FAX: 03-5993-5026
日本流体力学会年会 2001—流体力学における20世紀の総括と21世紀の展望—	H 13/7/31-8/2 工学院大学 (新宿校舎)	日本流体力学会 TEL: 03-3714-0427 FAX: 03-3714-0424

## ◇ 平成13年度会費納入のお願い ◇

平成13年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、平成13年3月23日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員 1口 70,000円  
正会員 5,000円  
学生会員 2,500円

郵便為替	00170-9-179578
銀行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座 1703707
いずれも口座名は(株)日本ガスタービン学会です。	

※かねてより会費自動振替のご協力をお願いしておりますが、未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上、事務局宛お送り下さい。自動振替をご利用されますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願い致します。

## 5. これからの工学教育は

大学の教官は教育者であるだけでなく研究者として努力をされている。しかし学生から見ると先生は教育に使う時間より、研究に使う時間のほうが多く授業がマンネリ化しているように写っているようだ。大学4年間は約3.5万時間だが、その間の総授業時間数は約5%の約1600時間程度と少ない。工学部での授業は記号のような数学を用い実感を伴いにくい授業が多く、視聴覚を越えた実験・実習を含む授業時間数は次第に減少しているようだ。

わが国の18歳人口は今から10年前、200万人/年を越えていたが、今は170万人/年と聞いている。現在生まれている赤ちゃんは120万人/年という少子高齢化時代を迎えて大学冬の時代に入っている。また現在公表されている赤字財政で国民一人当たり500万円にもなっているが、特別会計には更なる赤字が隠されている可能性がある。このまま行けば福祉厚生予算や環境予算が急増中で国立大学の予算も切り詰められる可能性が高い。この一方で大学は独立法人化が進みIT時代を迎えると「目の前大学」の存亡が大きく問われる時代になっている。

## ▷ 入会者名簿 ◁

[正会員] 天 野 孝 一 ( I H I ) [学生会員から正会員] 大 谷 浄 (ヤンマーディーゼル)  
北 垣 壽 (大阪冶金興業) 藤 田 邦 夫 (石 垣) 竹 内 寛 ( I H I ) 岡 本 泰 雄 (いすゞ自動車)

## ○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第29回可視化情報シンポジウム	H 13/7/17-19 工学院大学 (新宿校舎)	可視化情報学会 TEL: 03-5993-5020 FAX: 03-5993-5026
日本流体力学会年会 2001—流体力学における20世紀の総括と21世紀の展望—	H 13/7/31-8/2 工学院大学 (新宿校舎)	日本流体力学会 TEL: 03-3714-0427 FAX: 03-3714-0424

## ◇ 平成13年度会費納入のお願い ◇

平成13年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、平成13年3月23日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員 1口 70,000円  
正会員 5,000円  
学生会員 2,500円

郵便為替	00170-9-179578
銀行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座 1703707
いずれも口座名は(株)日本ガスタービン学会です。	

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが、未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上、事務局宛お送り下さい。自動振替をご利用されますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願い致します。

## 三菱重工業(株) 高砂研究所におけるガスタービン研究

青木 素直\*<sup>1</sup>

AOKI Sunao

田代 光\*<sup>1</sup>

TASHIRO Hikaru

キーワード：高温，冷却，耐熱材料，鋳造，コーティング，CFD，燃焼，振動，トライボロジー  
High Temperature, Cooling, Superalloy, Casting, Coating, CFD, Combustion, Vibration, Tribology

### 1. はじめに

高砂研究所は1908年(明治41年)に三菱重工業(株)神戸造船所内に創設した化学係が起源であり、その後材料、流体他の分野が加わった。1964年に神戸造船所から独立して神戸研究所となり、1973年に現在の兵庫県高砂市に移転、名前を高砂研究所に変更し現在に至った。三菱重工業(株)のガスタービン技術に関する中心的研究所であり、ガスタービンに関する全ての技術分野を担当している。高砂研究所は要素技術開発にとどまらず、ガスタービンのコンポーネント設計も行う実戦的な研究所である。

以下に、ガスタービン技術に対する高砂研究所の取り組み状況を紹介する。

### 2. 主要技術取り組み状況

#### 2.1 冷却技術

三菱重工業(株)は、MF 111, M 501 F/M 701 F, M 501 G/M 701 G ガスタービン他を開発し、産業用ガスタービ

ンの高温化をリードしてきた。高砂研究所では、基本的なタービン翼冷却構造であるフィルム冷却、インピンジメント冷却、ピンフィン冷却、対流冷却について広範な実験を行い、最適幾何形状、穴配置に関するデータを蓄積するとともに、詳細な現象把握とそれに基づく冷却構造の高度化を進めてきた。それに加え、最近では、冷却通路設計にCFDコードを適用し、予測精度を高めている。伝熱試験装置の一例としてサーペントイン対流冷却試験装置を図1に示す。これら伝熱要素モデルを用いた基礎的な試験に加え、図2に示す低速大型タービン試験装置を用いて、動静翼回りの熱伝達率分布、フィルム冷却効率分布に、上下流の翼及び回転が与える影響を計測している。これらのデータはガスタービン翼統合設計システム TDSYS に組み込まれ冷却翼設計に使用されている。

#### 2.2 耐熱材料

高砂研究所では、MGA 1400, MGA 2400 (MGA: Mitsubishi Gas Turbine Alloy) に代表されるNi基動静翼耐熱合金、ローターディスク用高Cr鋼など新材料の開発とそれらの強度試験を行っている。試験装置の一例を図3に示す。クリープ強度、熱疲労、高サイクル疲労、

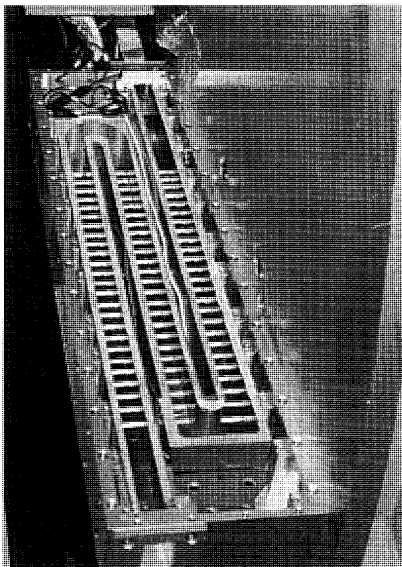


図1 サーペントイン対流冷却試験装置

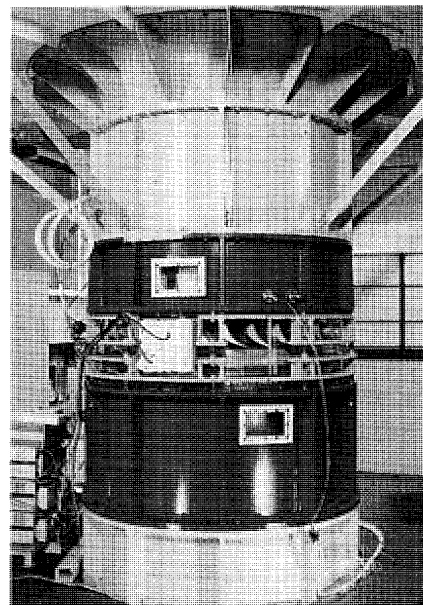


図2 低速大型タービン試験装置

原稿受付 2001年1月19日

\* 1 三菱重工業(株) 高砂研究所

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1

酸化特性などの材料特性は、設計データ化されガスタービン翼統合設計システム TDSYS に組み込まれ翼設計に使用されている。

一方向凝固翼，単結晶翼に関する精密鑄造技術の開発は，鑄型材料や冷却条件の最適化，更には受け入れ基準の作成に至る全体プロセスを取り扱っている。鑄造プロセスの最適化は，実験的手法に加え凝固シミュレーションを活用している。図4に真空炉を，凝固シミュレーションの計算例を図5に示す。

2.3 コーティング技術

遮熱コーティング，いわゆる TBC (Thermal Barrier Coating) は，高温ガスタービンのキーテクノロジーの一つである。高砂研究所では，15年に亘り，産業用大型タービン翼，燃焼器に適した TBC の開発を行っている。TBC 施工プロセスの最適化を始めとして実機検証テストまで広範な内容で開発を推進している。主なテーマは，耐久性向上を目的とした高温で安定性の良いセラミックコーティング及びボンドコーティングの開発である。新規開発の TBC は，熱サイクル試験により剥離までのサ

イクル数を確認した後，ガスタービンに試適用しフィールド試験による最終検証を実施している。熱サイクル試験装置を図6に示す。

2.4 最新空力設計と CFD

タービン，圧縮機の空力設計は計算機，CFD の急速な進歩により，軸対称流計算に基づく設計から非粘性3次元流れ計算，更には3次元粘性流計算を用いた設計へと発展してきた。三菱重工業(株)は，タービン翼の3次元設計を産業用ガスタービンとして世界で初めて適用し，タービン効率を改善させた。現在は，定常及び非定常多段3次元粘性流計算を併用した空力設計を行っている。タービン設計では，空力設計と冷却設計の最適化が重要であり，多段3次元流れ計算では，冷却空気の混入，チップクリアランスの影響を考慮した計算を行っている。圧縮機についても同様の CFD コードを使用している。衝撃波が複雑に発生する遷音速段の設計には，これらのコードが極めて有効である。CFD コードの精度検証には，上述した低速大型タービン試験装置 (圧縮機用にも転用可)，図7に示す2次元遷音速翼列風洞及びモデル

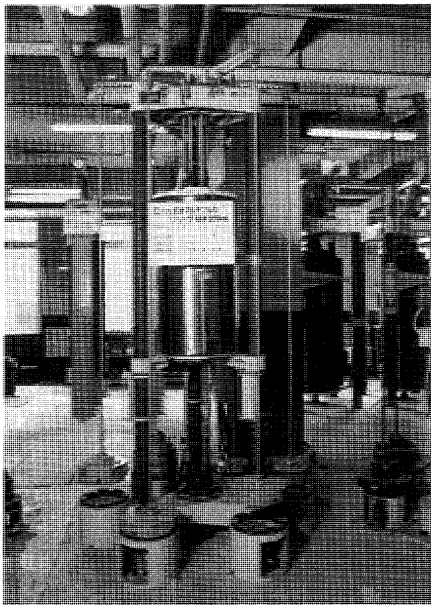


図3 クリープ破断試験装置

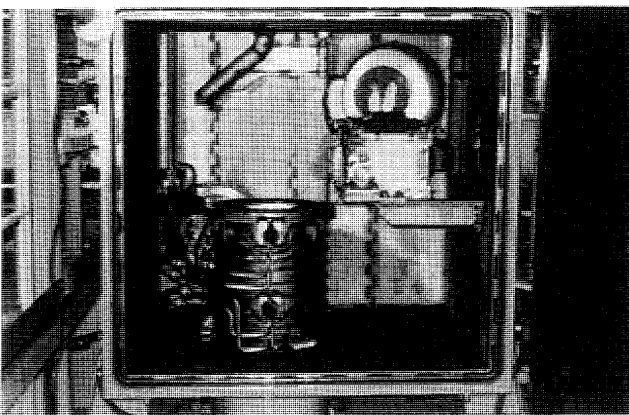


図4 精密鑄造真空炉

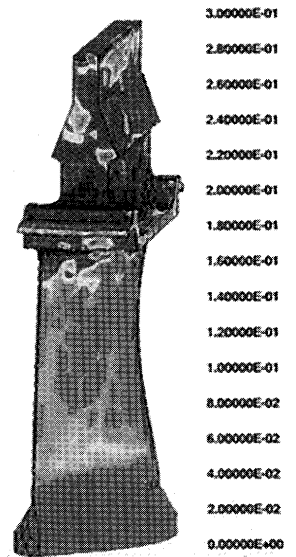


図5 精密鑄造凝固シミュレーション計算例

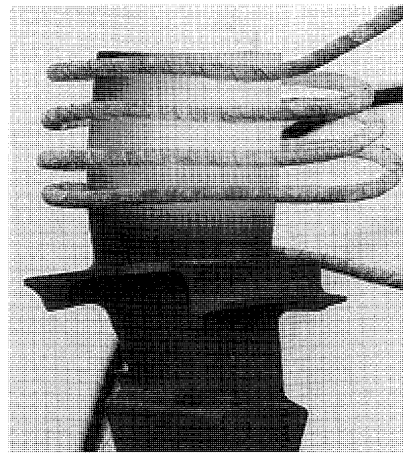


図6 熱サイクル試験装置

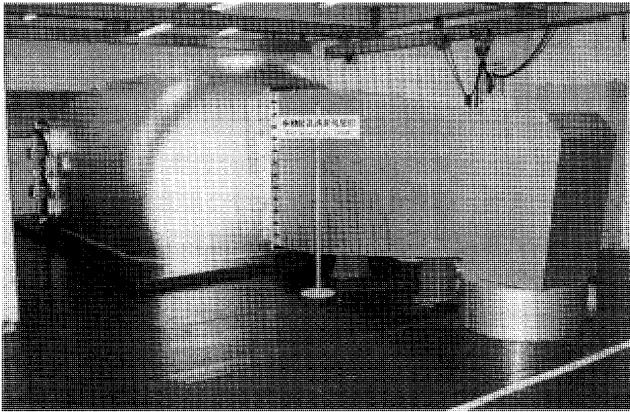


図7 2次元遷音速翼列風洞

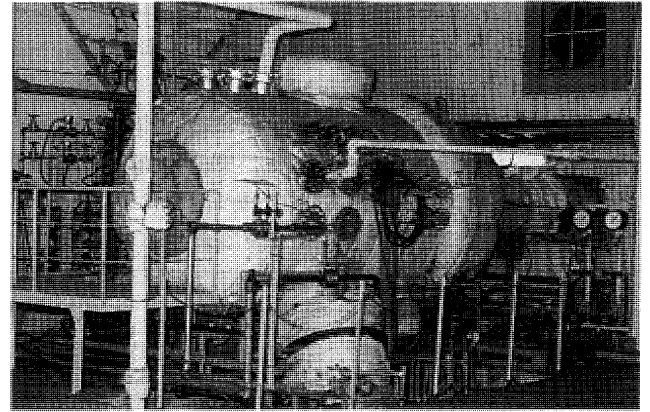


図8 燃焼試験装置

タービン・圧縮機試験装置を活用している。

### 2.5 燃焼技術

低NO<sub>x</sub>技術は、現在、最も関心が高い技術である。よく知られているように燃焼温度の上昇とともにNO<sub>x</sub>は増加する。三菱重工業(株)は、世界初の予混合低NO<sub>x</sub>燃焼器、引き続き、マルチノズル形予混合低NO<sub>x</sub>燃焼器、蒸気冷却燃焼器を開発し、高温化とNO<sub>x</sub>低減の両立を進めている。低NO<sub>x</sub>化の最大の課題は、燃焼振動の抑制である。燃焼試験に加え数値シミュレーションにより燃焼振動発生現象を解析することで、燃焼振動抑制技術の改善を進めている。これに加え、燃料の多様化技術にも積極的に取り組んでいる。石炭ガス化ガス用燃焼器、石油精製工場や化学プラントの副生ガス用燃焼器、重質油用燃焼器等の開発を行っている。燃焼試験装置の一例を図8に示す。

### 2.6 その他の技術

軸受等トライボロジー技術、振動・騒音の評価・抑制技術、車室・ロータ変形を考慮した構造設計技術、運転監視・支援のための制御システム技術、補修技術なども高砂研究所で開発を行っている。これらの技術の多くに数値シミュレーションを積極的に取り込んでいる。中でも、翼振動特性予測技術では、翼固有の振動特性予測に、CFDコードで予測される流体励振力を組み合わせて、振動応力を精度良く予測することに注力している。

### 3. おわりに

以上高砂研究所におけるガスタービン研究の概要を紹介した。三菱重工業(株)は大型高温ガスタービンを自社開発できる我国唯一のガスタービンメーカーである。欧米の一流ガスタービンメーカーと肩を並べるワールドクラスのガスタービン技術の構築に引き続き邁進する所存である。本稿が読者の参考になれば幸いである。

# 名古屋大学高温エネルギー変換研究センターにおける研究活動

古畑 朋彦\*1

FURUHATA Tomohiko

## 1. はじめに

名古屋大学高温エネルギー変換研究センターは、省資源・省エネルギー技術としての高温・高効率エネルギー変換のための燃焼技術開発、ならびに高温耐熱材料開発に関する教育研究と共に、エネルギー利用およびこれに関連する環境問題に関する教育研究を行う機関として、平成4(1992)年4月10日に学内共同利用センターとして設置された。

本センターでは、従来のコンバインドサイクルとは全く異なる新しいコンセプトに基づいた発電用高温ガスタービンシステム、“ケミカルガスタービンシステム(図1)”を提案し、その実現に向けた研究開発を行っている<sup>(1)~(4)</sup>。

ケミカルガスタービンシステムが現在のコンバインドサイクルと大きく異なる点を以下に挙げる。

- 二系統のガスタービンと一系統のスチームタービン
- 燃料過濃燃焼(第一段燃焼器)
- 炭素繊維強化炭素複合材料(C/Cコンポジット)製タービンブレード(第一段ガスタービン)

本システムの実現のためには、低NO<sub>x</sub>かつ高効率燃焼器の開発、および1500℃以上の高温に耐える材料開発が最も重要である。当センターでは上記を含め、次の5点の課題に着目し、これまで研究を実施してきている。

- (1) 燃料過濃燃焼の燃焼解析
- (2) 高温エネルギー変換システムのシステム解析
- (3) 高温場計測技術の開発
- (4) 超高温(1500℃以上)耐熱材料の開発
- (5) 環境対応技術開発

## 2. 燃料過濃燃焼の燃焼解析

燃料過濃燃焼法に着目した例はこれまで皆無であったため、当センターでは燃焼器内圧力を最高40気圧まで設定可能な高圧・燃料過濃燃焼器を試作し、燃料過濃燃焼の燃焼解析を行った。また、燃料過濃燃焼の数値計算コードの開発にも取り組んできた。これまで得られた研究成果の一例を図2に示す<sup>(5)~(7)</sup>。本結果は燃料にメタンを用い、燃焼器内圧力10気圧、当量比1.32についてのものである。

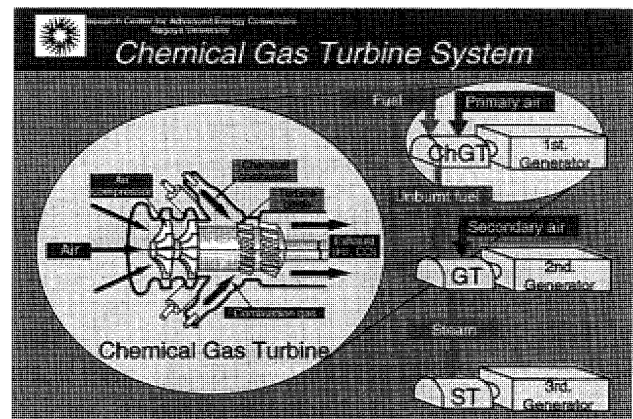


図1 ケミカルガスタービンシステム概念図

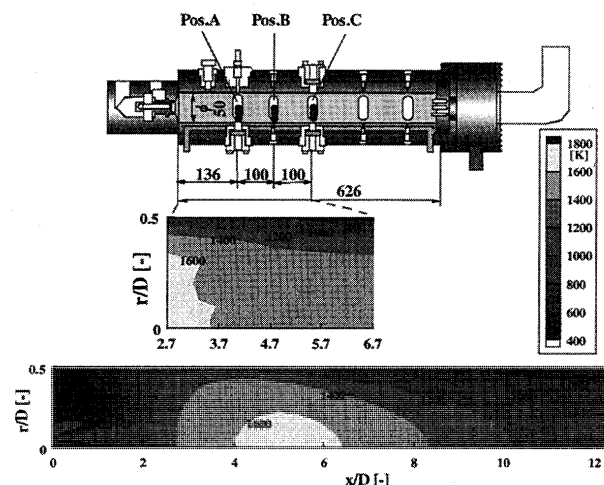


図2 高圧・燃料過濃燃焼器内温度分布の測定結果ならびに数値計算結果

## 3. 高温エネルギー変換システムのシステム解析

システム解析はエネルギープラントの高効率化を推し進める上で有効な手法である。当研究室では海外の研究機関と共同でケミカルガスタービンシステムのシステム解析を行ってきた<sup>(3)(4)</sup>。図3に環境汚染物質であるNO<sub>x</sub>の発電出力当たりの排出量を通常のコンバインドサイクルと比較して示す。図より、ケミカルガスタービンシステムでは、NO<sub>x</sub>が大幅に削減されているが、これは第1段燃焼器が、燃料過濃(還元雰囲気)条件にて運転されることが大きく寄与しているものと推察される。

## 4. 高温場計測技術に関する研究開発

高温エネルギー変換技術においては、燃焼場などの高

原稿受付 2001年1月12日

\*1 名古屋大学高温エネルギー変換研究センター  
〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

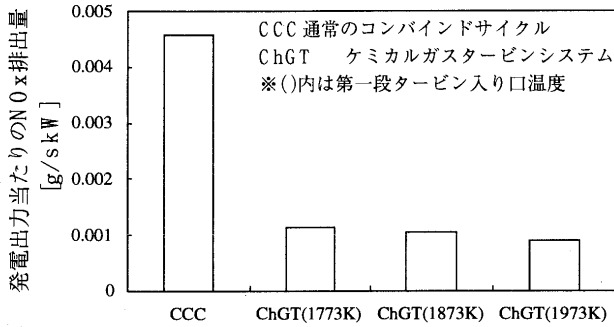


図3 ケミカルガスタービンシステムの発電出力基準のNOx 排出量

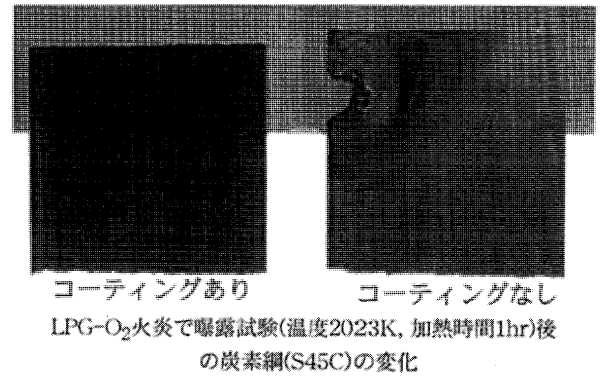


図5 高放射セラミックスの耐熱試験結果

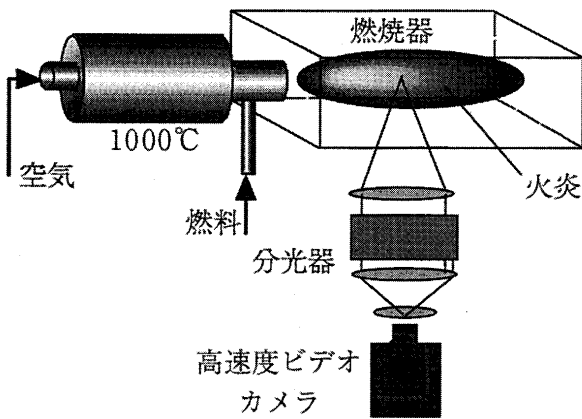


図4 高速分光ビデオカメラ温度測定システム

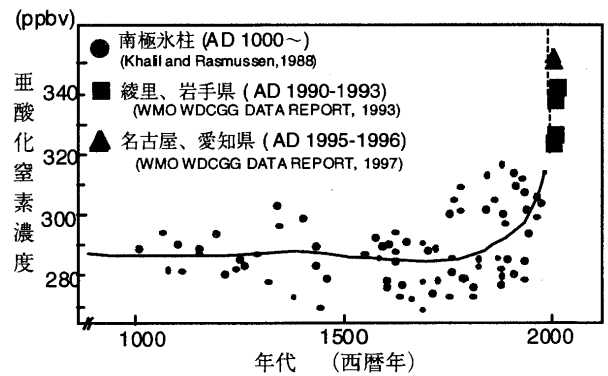


図6 大気中亜酸化窒素濃度の年代変化

温場の計測技術を確立することがその変換効率の向上に極めて重要である。当センターでは高温場の温度分布を非接触にて計測可能な高速分光ビデオカメラ温度測定システムを構築した(図4)。本システムは高温場中の化学種(OH, CH, C<sub>2</sub>等)から発するスペクトル線の強度の空間的・時間的に分解された像をコンピューターに取り込み、計算することにより火炎の二次元温度分布を決定するものである<sup>(8)(9)</sup>。

5. 超高温耐熱材料に関する研究

当センターでは、ノリタケカンパニーリミテドおよびTYKと共同で、高放射セラミックスならびにC/Cコンポジットの耐熱・耐酸化コーティング技術の研究開発を行っている。前者は、高放射顔料をガラスセラミックスに添加した材料で、1800°Cの高温でも高い放射率を保つ特性を有することから耐熱性を飛躍的に向上させることができる(図5)。後者は、C/Cコンポジットをパックスメンテーション法によるSiC被覆に加え、ガラス質を2次被覆することにより高温劣化をほぼ完全に防ぐことができる<sup>(10)~(13)</sup>。

6. 環境計測に関する研究

亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)は、フロン同様にオゾン層破壊物質であると共に炭酸ガスと比較して数百倍の温室効果を有する。フロン、二酸化炭素についてのモニタリングは

世界各地で行われているが、N<sub>2</sub>Oの大気モニタリングに関しては、日本では岩手県の綾里にある気象庁の観測所と当センターの2点しか公表されていない(図6)。このデータは「都市における大気中N<sub>2</sub>Oの測定結果」として、World Meteorological Organization(WMO)のWMO WDCGG(World Data Center for Greenhouse Gases)Data Report等に提供している<sup>(14)(15)</sup>。

7. おわりに

本稿では当センターの研究活動について5点に絞り簡単ではあるが紹介した。詳細については参考文献を参照されたい。

現在、様々なエネルギー問題が山積している。当センターも引き続き「環境対応型エネルギー有効利用技術」をキーワードに研究を推進し、21世紀型のエネルギー利用技術を社会に向けて広く発信していく所存である。

参考文献

- (1) 新井紀男, 小林敬幸, エネルギー・資源, 16-6(1995), p. 74
- (2) 新井紀男, 流体熱工学研究, 30-1 (1995), p. 53
- (3) 新田伸也, 新井紀男, 流体熱工学研究, 33-1(平10-6), p. 39
- (4) Lior, N., Arai, N., ASME Thermophysics and Heat Transfer, 4 (1998), p. 33
- (5) Kobayashi, N., Mano, T., Arai, N., Energy, 22-2/3 (1997), p. 187
- (6) 山本剛, 宮崎智永, 小林敬幸, 新井紀男, 田中雅, 流体熱工

- 学研究, 31-2 (1996), p. 49
- (7) Yamamoto, T., Miyazaki, T., Furuhata, T., Arai, N., Flow Visual. & Image Proc. ,5 (1998), p. 51
- (8) Ishiguro, T., Tsuge, S., Furuhata, T., Kitagawa, K., Arai, N., Hasegawa, T., Tanaka, R., Gupta, A., K., 27 th Symp. On Comb. ,1 (1998), p. 3205
- (9) Fukui, S., Tsuge, S., Kitagawa, K., Arai, N., 分光研究, 47-4 (1998), p. 180
- (10) 加知岳志, 小林敬幸, 新井紀男, 加藤吉成, 各務欣哉, 化学工学論文集, 23-6 (1997), p. 928
- (11) 新井紀男, 小林敬幸, クリーンエネルギー, 5-3(1996), p. 51
- (12) Fushitani, K., Kobayashi, N., Arai, N., Chem. Eng. Japan, 30-3 (1997), p. 580
- (13) Kato, Y., Kakamu, K., Hironaka, Y., Arai, N., Kobayashi, N., Pierre, R. St. G., Chem. Eng. Japan, 29-4 (1996), p. 669
- (14) 松浪有高, 北川邦行, 浅井勝一, 小林敬幸, 新井紀男, 松本幸三, 分光研究, 46-1 (1997), p. 16
- (15) 鎌田祐一, 松浪有高, 北川邦行, 新井紀男, 古畑朋彦, エネルギー・資源, 19-4 (1998), p. 76



# EBARA/ELLIOTT マイクロガスタービン TA シリーズ

小林 利充\*<sup>1</sup>  
KOBAYASHI Toshimitsu

片岡 匡史\*<sup>1</sup>  
KATAOKA Tadashi

山本 学\*<sup>1</sup>  
YAMAMOTO Manabu

キーワード：EBARA/ELLIOTT マイクロガスタービン，TA シリーズ，TA 60，TA 80，TA 200，  
コージェネレーション，排熱回収  
EBARA/ELLIOTT Micro Gas Turbine, TA Series, Co-generation, Heat Recovery

## 1. はじめに

マイクロガスタービンは小型分散型電源として大きな可能性を秘めており，世界市場で注目を浴びている。国内外問わず各社が競って開発を進めているが，当社の場合，米国子会社である Elliott 社と共同開発を進めている。本稿では，当社マイクロガスタービンの概要について，紹介する。

## 2. 機器概要

### 2.1 マイクロガスタービンの特徴

Ebara/Elliott マイクロガスタービン TA\*シリーズは当面，以下の3機種でラインアップ構成する予定である。

TA 60 (60 kW 級)，TA 80 (80 kW 級)，TA 200 (200 kW 級)

(\*: Turbo Alternator のイニシャルを取ってネーミング)

TA 60，TA 80 の主な仕様および一般的な特徴を以下に示す。

表1 TA 60, TA 80 パッケージ主仕様 (予想値)

マイクロガスタービン機種	TA 60	TA 80
ガスタービン形式	1軸式再生サイクル	
定格出力*1	kW	60 80
電圧，周波数	V, Hz	400~480, 50/60
発電熱効率*2	%	27 29
排ガス温度*2	℃	260 238
排ガス量*2	kg/h	2,100 2,800
排気 NOx 濃度	ppmVD (16% O <sub>2</sub> )	≤15~25 (ガス燃料) ≤30~50 (液体燃料)
ロータ形式	圧縮機，タービン，発電機ロータ一体型	
ロータ回転速度	min <sup>-1</sup>	115,000 68,000
圧力比	4:1	
圧縮機/タービン形式	遠心式(単段)/ラジアル式(単段)	
燃焼器形式	アニュラー式	
ロータ軸受形式	滑り/ころがり軸受	
潤滑，冷却方式	油潤滑/油冷却	
パッケージ寸法*3	m	L 2.0×W 0.8×H 1.8 L 2.3×W 1.0×H 2.0
パッケージ重量*3	ton	1.0 1.5
騒音値	dBA	65 (機側 1m)

\*1:吸気条件 15℃/1013 hPa, \*2:定格出力時, \*3:モノジェネパッケージ

原稿受付 2001年2月5日

\*1 (株)荏原製作所 気体機械事業部 マイクロガスタービン事業推進室

〒144-8510 東京都大田区羽田旭町 11-1

### 1) 小型軽量

既存製品 (DE,GE) と比べ，重量で約 1/2，占有スペースは約 2/3 程度になっている。

### 2) 高効率

既存製品とほぼ同等の発電効率を持ち，コージェネレーションで使用すれば，70% 以上の総合熱効率が得られる。

### 3) 低公害性

表1に示すように NOx 排出量は非常に少なく，環境保全に優れている。また，騒音値は低く抑えられ，振動もほとんど発生しないため，設置場所の自由度が高い。

### 4) 運転柔軟性

50/60 Hz いずれの周波数でも運用可能であり，燃料は液体・ガスの選択ができるように設計されている。(燃料種別については，発注時に決定要。)

### 5) 低メンテナンスコスト

主要部の構造が非常に単純であるため，メンテナンスコストを安価にできる。

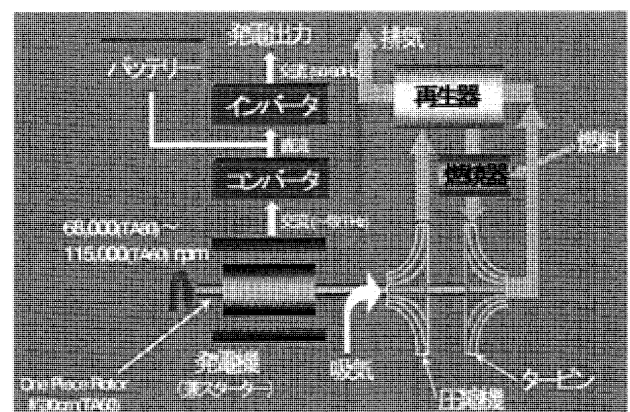


図1 マイクロガスタービン基本フロー

### 2.2 他社マイクロガスタービンとの主な相違点

弊社 TA シリーズマイクロガスタービンは，タービンと発電機を直結した高速回転体，逆変換装置および再生器の採用等，概ね他社のマイクロガスタービンと同一思想で開発を進めているが，他社と異なる点も少なくない。最も顕著な相違点として，軸受潤滑および発電機の

冷却媒体に油を採用している点が挙げられる。弊社の場合、200 kW 級あるいはそれ以上の高出力機種を開発を予定しており、すべて同一設計思想でまとめる方針である。軸受潤滑には空気を採用することも選択肢のひとつと考えられるが、空気軸受の採用は100 kW を超えるレンジでの十分な検証が困難と判断し、油潤滑を採用することとなった。また、発電機の冷却については、マイクロガスタービンの発電機の体積が従来型低速発電機の1/100 以下であるため、空気では十分な冷却が不可能と考えられ、油冷却方式を採用するに至った。一方、油を採用する場合、油の消耗、メンテナンスの煩雑さ等が懸念されるが、油消費量は極めて少量（予想値：約1リッター程度/8000 時間）であるため、まったく問題ない。油ポンプは直流電動機で駆動されるが、電源はパッケージ内部のバッテリーから供給されるため、外部電源を必要としない。また、油ポンプ電動機は両軸駆動が可能で液体燃料時には燃料噴射ポンプも装備できるので、新たに駆動機を設置する必要が無い。

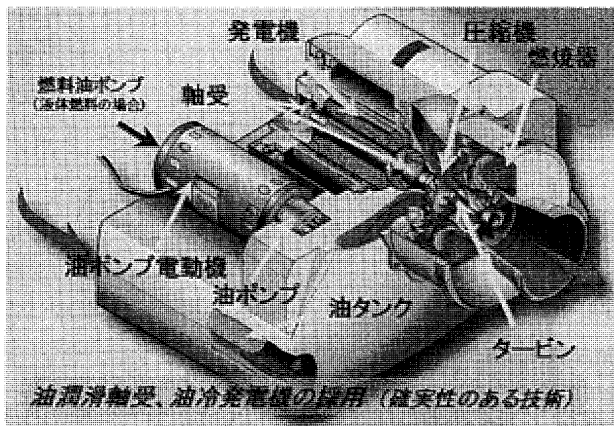


図2 マイクロガスタービン (TA 60) 構造

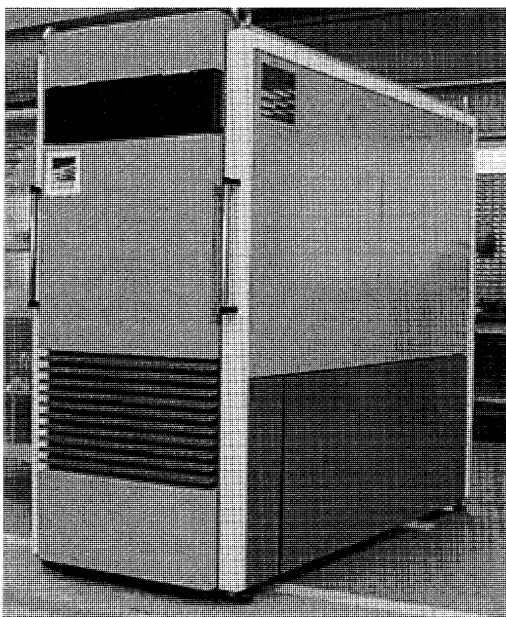


図3 パッケージ概観

### 3. コージェネレーションパッケージ

マイクロガスタービンは発電効率がまだ30% 以下であるため、単純発電ではなかなかメリットが出しにくい実情にある。従って、排熱回収を行うコージェネレーション設備として設置されるケースが大半と考えられる。排熱回収には温水、蒸気および排ガスを直接プロセスで利用する等の形態があるが、それぞれニーズに応じて、システム開発を行っていく必要がある。弊社の場合、まず最初に温水を発生させるコージェネシステムの開発、検証を行っていく予定で、他のシステムについても併行して開発を進めていく。温水は約90℃の温水を発生させるシステムとし、排熱を給湯・暖房用途だけではなく、冷房用途にも使用できるように配慮した。

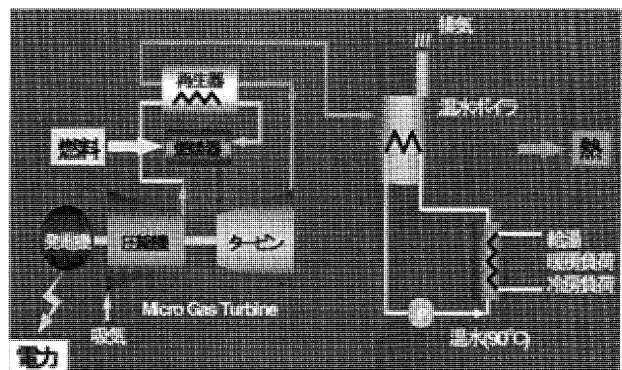


図4 コージェネレーションフロー

表2 TA 60, TA 80 コージェネパッケージ仕様(予想値)

マイクロガスタービン機種		TA 60	TA 80
定格出力	kW	60	80
燃料消費率	kJ/kWh	13300	12410
発電熱効率	%	27	29
燃料消費量[液体燃料]*1	kg/h(L/h)	18.6(23.3)	23.0(28.9)
燃料消費量[ガス燃料]*1	kg/h(Nm <sup>3</sup> /h)	16.3(19.2)	20.2(23.9)
排ガス温度	℃	260	238
排ガス量	kg/h	2100	2800
排熱回収熱量	MJ/h(kW)	367.6(102.1)	423.4(117.6)
温水ボイラ出入口温度	℃	80 (入口) / 90 (出口)	
排熱回収温水量	kg/h	8600	9900
総合熱効率	%	73	71.6
冷水供給能力*2	USRT	20.3	23.4

\* 1 : 液体燃料 LHV 43100 kJ/kg (34400 kJ/L),  
 ガス燃料 LHV 49200 kJ/kg (41600 kJ/Nm<sup>3</sup>)

\* 2 : 吸収式冷凍機を装備した場合

### 4. おわりに

現在、諸表に掲載した性能・機能の実現を目標に開発を進めているが、同時に耐久性の十分な検証も重要であり、段階的な製品開発ステップを踏む必要があると判断している。弊社としては、今年の4~8月を目処にTA 60, TA 80の準商用機 (Mark 0) の発売を予定している。Mark 0は生産台数を限定し、顧客にモニター販売

していくものである。性能・機能をさらに充実させた本格的な量産機（Mark 1）は、フィールド試験等で耐久性の検証を十分行ったうえで発売する予定である。尚、TA 200 については、2002 年の発売を目標に開発を進行中である。マイクロガスタービンが広く普及するためには、低価格化および規制緩和等のインフラ整備が重要で

あるが、発電熱効率の向上も重要課題である。メーカーの立場としては、様々な形態のコージェネシステム開発および価格低減努力等を行い市場ニーズに答えていくが、継続して発電効率の向上に向けても、注力していく所存である。

# GP 1000-COPRA コージェネレーションシステム

服部 学明\*1

HATTORI Gakumei

キーワード：1 MW クラス熱電可変型コージェネレーション

## 1. はじめに

コージェネレーションの普及が拡大するに連れて従来の様に電気と熱を最大限に利用出来るケースが少なくなってきた。

1 MW クラスのガスタービンコージェネレーションシステム GP 1000 (ガス大手 3 社との共同開発機) にも熱電可変の要求が高まり、排熱回収ボイラで発生する蒸気の一部をガスタービン内に注入し、発電出力と送気蒸気量を自由に変更出来る蒸気注入型熱電可変式 GP 1000-COPRA (Cogeneration Power Ratio Adjustable) を東京ガス(株)、大阪ガス(株)、東邦ガス(株)と共同で開発したので、その概要、特徴等を紹介する。

## 2. GP 1000-COPRA の概要

蒸気注入型熱電可変式 GP 1000-COPRA のベースとなった GP 1000 のガスタービンは国産の SB 5 型を採用している。

本ガスタービンは、遠心式 2 段圧縮機、軸流式 4 段タービンを備え、圧縮機の中に冷却器を設けて効率のアップを図っている。

蒸気注入型に改良する際に一番問題となるサージマージンの減少を抑えるために、圧縮機ディフューザの性能改良を行ってサージマージンの拡大を図り、従来に比べて約 3 倍 (発生蒸気量の約 1/3) の蒸気を注入することが可能となった。

また排熱回収ボイラは GP 1000 用標準ボイラに注入蒸気を過熱するスーパーヒータを追加設置し、改良前のコージェネシステムの特徴を生かしたものとした。

## 3. GP 1000-COPRA の特徴

### 3.1 ガスタービン

燃焼器は GP 1000 と同様に多くの実績を有する希薄予混合型燃焼器を採用し、蒸気注入を行わない場合でも低 NOx を実現しており、主な特徴は次の通りである。

- ①最大で約 1 t/h の蒸気をガスタービン内に注入し、発電出力を 1,090 kW から 1,270 kW に増加することができる。

- ②蒸気注入をしない場合でも、従来と同一の性能を有する。

- ③NOx 値は、ドライ・蒸気注入の両モードで 150 ppm @O<sub>2</sub> = 0 % 以下を保証できる。

- ④ドライと蒸気注入運転モードの切替えは押し釦で行えるシンプルな制御システムを採用している。

ガスタービンの断面は図 1 を参照下さい。

### 3.2 蒸気注入装置

排熱回収ボイラで発生した蒸気の内、最大で約 1/3 の余剰となった蒸気は、過熱器を通して約 10℃ 過熱された後燃焼器入口部 (圧縮機出口部) に注入される。

蒸気注入部のイメージは図 1 を参照下さい。

過熱しないで飽和蒸気の状態で注入すると、配管の途中でドレンが発生し、このドレンが燃焼器の失火や高温部品の寿命に悪影響を及ぼすため、過熱して更に蒸気管路を暖管することが重要な要素となる。

蒸気噴射ノズルから注入された蒸気は燃焼用空気と充分に混合して燃焼器に導入される。

蒸気注入割合 S/F (燃料流量に対する注入蒸気量の重量比率) は、サージマージンと燃焼安定性の実験結果より S/F=3 と設定し、また蒸気注入可能な発電出力を 800 kW 以上とした。

### 3.3 仕様と性能

GP 1000 と比較した GP 1000-COPRA の概略仕様を表 1 に示す。

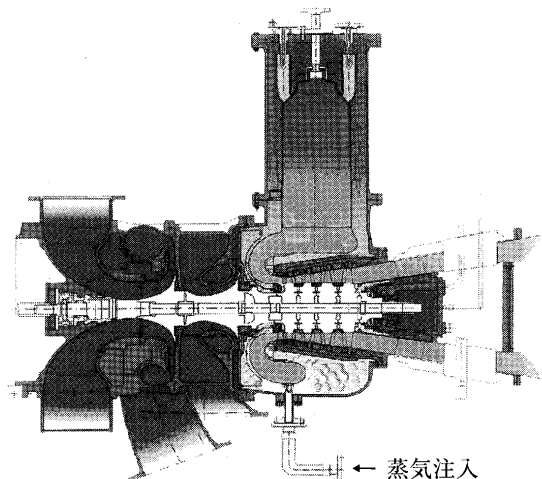


図 1

原稿受付 2001 年 2 月 9 日

\* 1 三井造船(株) 発電装置営業部

〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4

表1 ガスタービンの概略仕様

ガスタービン	GP1000	GP1000-COPRA
空気圧縮機	遠心式2段	遠心式2段
タービン	軸流式4段	軸流式4段
燃焼器	単缶型拡散/予混合二段燃焼式	単缶型拡散/予混合二段燃焼式
回転数	26,691rpm	26,691rpm
始動方式	電動機トルコン式	電動機インバータ式
減速装置	1段遊星 1段平行歯車式	2段遊星歯車式

表2 ガスタービン性能

項目	単位	ドライ 運転モード	蒸気注入 運転モード
発電端出力	kW	1,090	1,270
燃料消費量	m <sup>3</sup> N/h	379	404
注入蒸気量	ton/h	0	1.0
NOx排出濃度	ppm	150	150以下
発電端効率	%	24.9	27.2

- 備考 1) 上表は、吸気温度15℃、吸気圧損0.981kPa、排気圧損1.962kPaでの値を示す。  
 2) 注入蒸気の圧力は1.471MPa、温度は210℃です。  
 3) NOx値はO<sub>2</sub>=0%、ドライでの値です。  
 4) 発電端出力は発電機直結駆動式ガス圧縮機の所要動力を含みます。

発電出力の増加に伴い、減速機と発電機の容量をアップしている。

定格点の性能を表2に示す。

ドライ（蒸気注入停止）と蒸気注入運転を比較すると、発電端出力は1,090kWから1,270kWへ17%増加し、発電端効率も24.9%から27.2%へ9%向上する。

ガスタービンの特性として吸気温度が下がると発電端出力は増加するが、減速機の容量から最大で1,350kWに制限している。

運転方法は、運転モードとして蒸気注入モードとドライ運転モードの2種類を備え、切換スイッチ操作一つで選択が出来る。

また、蒸気注入運転においては、更に電力優先モードと熱電可変モードの2種類を備え、電力優先モードでは燃料の重量流量に対して最大3倍（S/F=3）の蒸気を常時注入して発電端出力を最大に保つ運転を行う。

一方、熱電可変モードを選択すると、プロセス側に蒸気を送気するのを優先し、プロセス側の蒸気需要が減少して蒸気が余ると、その余った蒸気を自動的にガスタービンに注入する運転を行う。

この蒸気注入型ガスタービンと排熱回収ボイラを組合わせたコージェネレーションシステムGP1000-COPRAの熱電可変運転範囲を図2に示す。

図2は熱電可変を行う発電端出力800kW以上で、ガスタービン吸気温度0℃、15℃、30℃の運転範囲を示すが、吸気温度が15℃の場合、ドライ運転モードでは①と②を結ぶ線上の運転を行い、蒸気注入モードを選択

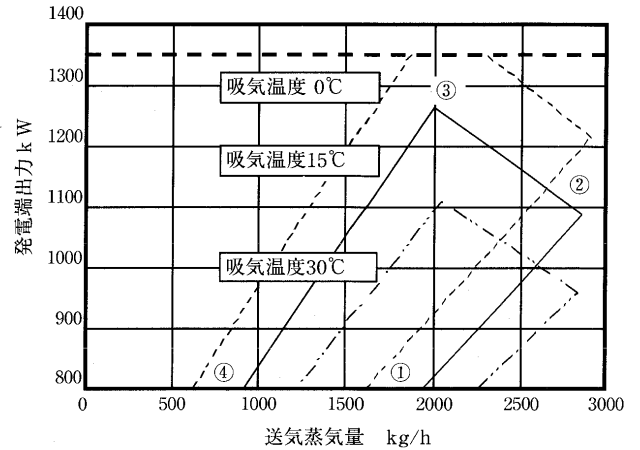


図2 熱電可変範囲

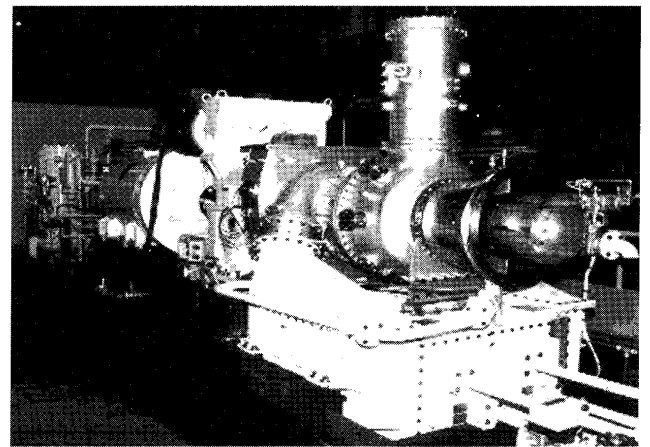


写真1

すると①②③④で囲まれたエリアが運転範囲となり、更に電力優先モードを選択すると③と④を結ぶ線上の運転となる。

#### 4. 開発及び試験

1995年から要素試験を開始し、圧縮機サージ試験、各部温度計測試験等を行い、1998年からは発電ユニットとしての性能と機能の確認を行い、計画通りの結果が得られ、1999年から販売を開始した。

写真1に発電ユニットの全体構造を示す。

2000年4月にはNO.1とNO.2号機が商用運転を開始した。

#### 5. おわりに

従来は余剰蒸気対策として、余った蒸気を直接大気中に放出したり、排熱回収ボイラの蒸気発生量を抑えるためにガスタービンの排ガスをバイパスさせていたが、GP1000-COPRAの開発により更に効率の良い運転が可能になった。

今後は、更に低NOx化、燃料の多用化等を計り、幅広い需要家に提案出来る予定である。

# 予混合式低 NO<sub>x</sub> 燃焼器

福江 一郎<sup>\*1</sup>

FUKUE Ichiro

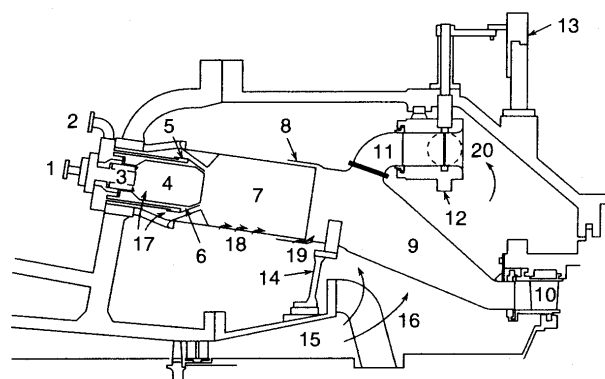
## 1. はじめに

表紙の写真は、三菱重工業(株)が世界に先駆けて実用化に成功した「予混合式低 NO<sub>x</sub> 燃焼器」である。この燃焼器は 1984 年に運開した東北電力(株)殿東新潟火力発電所第 3 号系列の MW 701 D ガスタービンに装着され 16 年間安全に運転されてきた実績がある。本燃焼器開発の動機は、当時世界最大容量の 1090 MW コンバインド発電所を建設することになった時、公害数値の目標として、ガスタービン出口 NO<sub>x</sub> 75 ppm、煙突出口 NO<sub>x</sub> 15 ppm を蒸気ならびに水噴射なしで達成すると言う高い目標を東北電力(株)殿より与えられた事に始まる。今日では、予混合式燃焼器は業界のスタンダード技術として広く使われているが、開発を開始した当時 (1980 年) は未だ予混合式燃焼器をガスタービンで実用化しているメーカーはなく、唯一 NASA で航空機用として基礎研究がなされているだけであった。だれも予混合式燃焼器がガスタービンに適用できると思わなかった時に、世界に先駆けて実用化できた意義は大きく、当時としては画期的な製品技術であったと言える。

## 2. 開発の経緯

開発を開始したのは 1980 年であるが、プラントの運開に間に合わせるため 3 年以内で実用化する必要があった。未だ参考とする燃焼器もなく、零からのスタートであったため、まずは燃焼器の基本コンセプト作りで全精力を費やした。とにかく最初は予混合式燃焼器の骨格を決定するため、色々なコンセプトの燃焼器を作り、片っ端から燃焼実験を実施して行くという開発手法を取った。ただし闇雲に試作するのではなく、予混合燃焼の根本的な欠点である安定燃焼範囲が狭いと言う特性は当然わかっていたので、この欠点を克服するために、予混合式燃焼器の基本コンセプトとして、(1)燃焼安定のためのパイロットバーナの設置、(2)燃空比調節のための空気バイパス弁の設置の 2 点を基本方針として設計に取り組んだ。図 1 に燃焼システムの概要を示す。これに加えて予混合ノズル内での均一な混合実現と予混合ノズルのフラッシュバック防止が大きな開発課題であった。最初は従来の拡散燃焼器の中間部に簡単な予混合ノズルを取りつけた燃焼器で実験したが、これは比較的上手く行き予混合

式燃焼器の将来に明るさと希望が持てた。図 3 に示すのは、加熱して赤熱させた木炭微粉を用いた気流可視化試験である。幸先のよいスタートに気を良くし、最初は少なくとも 2 年以内に開発は終了できると考えていたが、いざ実用型の燃焼器の実験を始めると種々の問題が発生



- |              |             |               |            |
|--------------|-------------|---------------|------------|
| 1 パイロット燃料供給  | 6 予混合ノズル    | 11 バイパスエルボ    | 16 圧縮機吐出空気 |
| 2 メイン燃料供給    | 7 メイン内筒     | 12 バイパス弁      | 17 燃焼用空気   |
| 3 パイロット燃料ノズル | 8 接続筒       | 13 駆動リング      | 18 冷却空気    |
| 4 パイロット内筒    | 9 尾筒        | 14 フレキシブルサポート | 19 希釈空気    |
| 5 メイン燃料ノズル   | 10 タービン1段静翼 | 15 ディフューザ     | 20 バイパス空気  |

図 1 燃焼システム概要

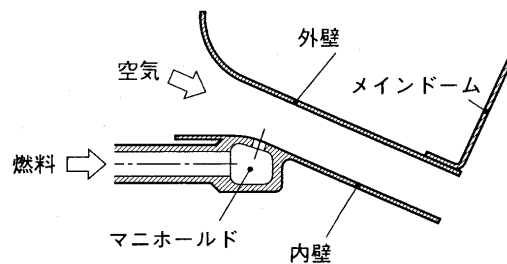


図 2 予混合ノズル

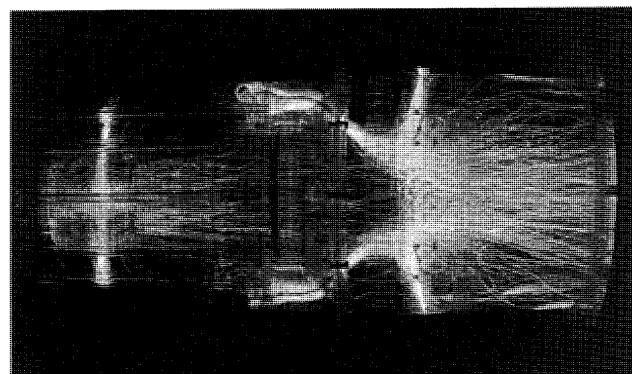


図 3 気流可視化試験

原稿受付 2001 年 1 月 12 日

\* 1 三菱重工業(株) 高砂製作所

〒676-0008 高砂市荒井町新浜 2-1-1

し、その後の開発は苦難の連続であった。現在においても、試作した燃焼器は実際のガスタービンと同じ圧力温度で燃焼実験が出来る加圧式の燃焼試験装置に装着してその特性を確かめるが、3年間に渡り実施した加圧下での燃焼実験はことごとく失敗の連続であった。燃焼試験するたびに燃焼器が黒焦げとなっているケースが多く、2年目を過ぎた頃から、プラントの運開時期から逆算した量産開始のタイムリミットは迫ってくるし、燃焼器は未だ完成しないし、関係者は本当に胃が痛くなるような毎日であった。失敗の殆どの原因は予混合ノズルのフラッシュバックによる焼損であり、この対策には相当にこずった。しかしながら種々試行錯誤する内に予混合ノズルの中で絶対にフラッシュバックしない方法（ノウハウ）が見つかり、いよいよ製作工程も押し迫り最後のチャンスの時期にさしかかった時に、構造設計者のひらめきで作ったのが表紙の写真にある最終形状である。土壇場に追い詰められて、祈るような気持ちで実施した最後の燃焼テストに見事成功し関係者で胸をなでおろした記憶がある。最終の燃焼器は写真でお分かりいただける様に、今見ても美しい形状をしており芸術的とも言える出来であると思う（やはり美しいものは性能も良い）。このように本当に苦労した開発であったが、開発期間中に明確に掴めなかった問題として燃焼振動がある。これについては残念ながら事前の燃焼試験では余り明確に特性が出ずに、実機で突然発生し大きなトラブルとなる性質のものであり、ご多分に漏れずこの燃焼器でも試運転段階で燃焼振動が発生し大いに困ることとなるが、開発期間中はこれを知る由もなかった。

### 3. 試運転

1984年の4月にいよいよ新しい予混合式燃焼器を装着した MW 701 D ガスタービンの試運転を開始した。最初の着火試験が上手く行かず18本の全燃焼器の着火に成功したのは2週間後であった。着火調節で手間取った後、ガスタービンの負荷を上昇しパイロット燃焼から予混合ノズルに切り替えた途端に大きな燃焼振動が発生し燃焼器のサポートにクラックが入るトラブルが発生した。これはサポート構造の強化とパイロット比率の調節で何とか解決し運転を継続できた。この燃焼振動は、予混合式燃焼器の宿命的な問題として、その後の開発に取り組んだガスタービンメーカを悩ませることとなり、まさに現在のガスタービン業界にとって共通で且つ最大の問題と言える。ガスタービンが定格負荷に上がったあと

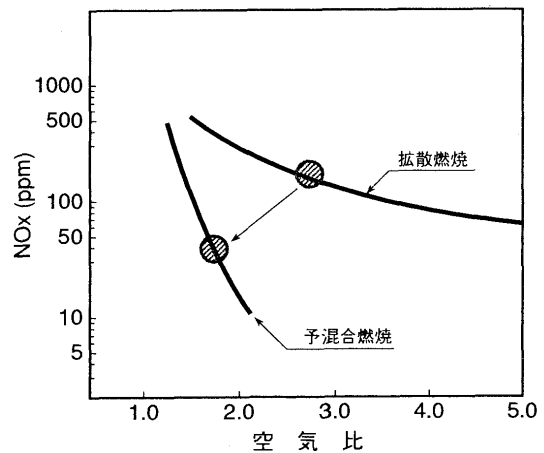


図4 NOx特性

のNOx値は非常に良好であり、調節によっては40ppm台のNOx値も記録した。試運転の後、実際の保守運用は東北電力(株)殿にゆだねられ燃焼調節も含めて16年間運用頂いているが、最初の子混合式燃焼器と言うことで燃焼調節はかなり微妙で且つ神経質であり関係者を悩ましていた点は開発者として常々申し訳ないと思っている。16年間に及ぶ運転で細かな改良をその都度加え、運開当時のコンセプトを保ったまま現在に至っている。この燃焼器で誇れるのは、運転中に一切フラッシュバックの経験がないという点であり、これは最初の3年間の開発期間中に徹底的に悩みぬいて根本的な解決策が見つげられた成果であると自負している。

### 4. 今後の展開

予混合式低NOx燃焼器は、現在世界中のガスタービンメーカがそれぞれのタイプを開発し、各地のプラントで運転されているが、NOxのターゲットが厳しいこともあり、かなりのプラントで燃焼振動あるいはフラッシュバックの本質的なトラブルが解決できず、メーカによっては燃焼器のトラブルが経営の足を引っばっているところもある。まさに予混合式燃焼器がガスタービンの信頼性の鍵を握っており、またこれに失敗したメーカにとっては、予混合式燃焼器が諸悪の根源となっていると言っても過言ではない。すでに予混合式燃焼器が開発されて20年になろうとしているが、ガスタービンの低NOx化の要求がますます厳しくなる中で、これまでの予混合燃焼技術をブレークスルーする新しい燃焼理論の出現が期待される昨今である。

## 「ガスタービンエンジン」

谷田好通, 長島利夫著

ガスタービンは多くの要素から複雑に構成された機械システムの一つであり、したがって関連する技術は多岐にわたる。そのすべてを網羅しようとすれば、大部の著述が必要となり、教科書としては必ずしも適当ではない。したがって過去に国内外で著されたガスタービンの教科書も、おおむね著者の視点によって記述が行われ、内容の取捨選択が行われており、これがそれぞれの特徴ともなっている。この意味では、今回発刊された本書「ガスタービン」は、緒言にも述べられているように、著者らの専門分野である熱流体性能の観点から既述がなされている。ガスタービンを学ぶにあたり、熱流体性能はその中心となる分野であり、著者らの選択は極めて妥当なものであろう。本書はガスタービンの入門教科書として著されたものであろうが、大学学部の授業に用いられる教科書としてみれば、全体の構成、内容の選択、記述量などよく考えられている。大学学部での授業にあてることの可能な限られたコマ数から考えると、その中になにを取り上げるか苦労するところであるが、著者らは必要と思われる項目は網羅し、しかも全体をどちらかというコンパクトな体裁にまとめており、簡にして要を得た説明が行われている。著者らの経験に拠るものと思われ、教科書として非常に使いやすいものとして成功している。本書のもう一つの特徴は、やはり最新のガスタービン技術について随所に述べられている点であろう。ガスタービンは発展を続けている原動機であり、その用途も年々広がっている。本書の中では、熱流体力学の基本を記すと同時に、新しい技術も触れられている。読者は熱流体力学の基本を学ぶと同時に、それが最新の製品につながっている様子を知ることができる。過去にもいくつかのすぐれた成書があるが、基礎技術内容もさることながら、新しいガスタービンの姿を学ぶことができる点で今回の著書は優れた特徴をもっていると思われる。

全体は11章からなっており、第1章ではガスタービンの歴史と発展が簡潔にまとめられている。読者は日本での発展と、航空用ガスタービンすなわちジェットエンジンの戦後のすばらしい発達を概観することができる。第2章では、熱と流れの基礎が述べられている。大学では熱力学や流体力学はそれぞれ別授業として講義が行われているから、ここではガスタービンの理解に必要な事項の説明にとどめてある。したがってナビエ・ストークス方程式などの流れの基礎式を最初から述べることはされていない。これらについては、それぞれ専門の参考書をあたればよいであろう。ガスタービンでは騒音発生が論じられることが多いが、音の生成機構、

伝播、放射についても簡潔に説明が行われており、読者にとってはありがたい。第3章では、ガスタービンの基本熱サイクル (Brayton cycle) が説明され、その改良としての再熱、再生サイクルも述べられている。ついで、その応用として、ターボジェット、ターボファンのサイクルが、効率その他の計算式および計算例を含め、読者が実行しやすい形で示されている。第4章から第7章までは、圧縮機、タービン、燃焼器などの主要要素の説明にあてられている。第4章では軸流圧縮機の二次元翼列を通過する流れの基本式、三次元翼列の流動形式の説明が、要領よく行われている。さらに非設計点を含めた作動特性と失速対策など、軸流圧縮機の設計で課題となる事項が万遍なく取り上げられており、読者は圧縮機の設計のフローについての知識を一通り得ることが出来るように工夫されている。第5章では、軸流タービンについて、タービン翼列とその特徴や作動特性、さらにタービンで重要な課題である翼冷却について最新のデータを交えて述べられており、読者は最新の技術レベルに接することができる。第6章は遠心圧縮機とラジアルタービンについて述べている。軸流形との違いを主として、その特徴と設計手法が簡潔に述べられている。第7章では、燃焼器、再熱器、再生器についてその性能計算式および構造が説明されている。これに先立って、燃料や燃焼の化学反応、火炎の挙動が簡単に説明されているので、読者の理解に役立つであろう。第8章では、圧縮機に発生する不安定現象として、サージと旋回失速、さらに翼列のフラッタが取り上げられている。いずれも学問的にも内容の深いテーマであるが、著者らの専門とするところでもあり、要点をついた簡潔な説明で、読者に理解させるよう工夫された説明が行われている。第9章では、非設計点で作動するエンジンの性能の計算式、および起動停止時や加減速時のエンジン制御について述べられている。ここでも、最近のジェットエンジンで採用されている全デジタル電子式制御 (FADEC) や翼端間隙のアクティブクリアランスコントロール (ACC) などの最新技術の概要を知ることが出来る。

以上の各章によって、読者はガスタービンの作動原理と基礎技術を理解し、同時に製品の最新の姿に触れることが出来るであろう。第10, 11章には、本書の特徴の一つともいべきガスタービンにまつわる新しい話題が取り上げられている。すなわち第9章では、最近社会的話題として多くの分野で取り上げられることの多い、環境問題に対して、ガスタービンの取り組みと技術開発成果が説明されている。なかでも騒音低減対策、排気の低



NOx 化対策について、最近の技術成果を交えてかなり詳しく述べられている。第 11 章は、ガスタービンの今後の展望ともいべきトピックスの説明にあてられている。高性能化に関連して、サイクルの改良ついで要素技術の向上が述べられており、タービン冷却や圧縮機の三次元翼列の空力設計、CFD など最新の技術を知ることができる。その他石油代替エネルギーとしてのメタノール、水素の利用に関する解説、今後の超大型航空機や極超音速機への対応の様子、新しいタービン耐熱材料や精密加工技術など、現在ガスタービンの分野で研究開発に力が注がれている国内外の主要なトピックスがほほもらすことなく取り上げられ、概観されている。読者はこの分野の技術開発の現状を知り、将来への期待を抱くであろう。最後に宇宙利用が予想される太陽熱利用ガスタービンや外径 12 mm の超マイクロガスタービンなどの夢のある話題にも触れられている。

以上本書の内容を概観したが、初めのほうの各章には例題が用意されており、ヒントと解答が付されているので、読者が理解を深めるのに役立つであろう。また本書の全体を通して、少し専門的に深くなる説明にたいしては小文字が使われた文章となっており、読者によって勉学の選択ができるよう工夫がされている。その他キーワードとなる語句は太文字で印刷されているので、興味のある対象を探すのに便利である。キーワードには英語表記も付けられており、読者への配慮がなされている。図も理解しやすい内容となっている。末尾に参考文献および索引が付されている。

以上のように、本書はガスタービン全般についてよくまとめられており、とくに大学学部の教科書としての使用に内容の選択、分量からみても適しているものと思われる。もちろん企業においても、ガスタービン技術者の教育用として使用できるであろう。この方面に関心をお持ちの一般読者に対しても、興味に応えられる内容となっている。

本書ではガスタービン関連技術の説明に、主に航空用すなわちジェットエンジンが引用されており、産業用や船用など輸送機関用ガスタービンについての記述は比較的少ない。この方面にさらに関心を持たれる読者は、本書を手がかりとしてさらに調査を進められると良いであろう。ガスタービン技術は、これまでの経緯から航空用が先行しているが、最近では産業用への技術移転が進み、技術差は小さくなっている。また経済性を重視するなど設計方針が異なる点もある。最近、新しい小形分散型電源として数十 kW クラスのマイクロガスタービンの開発が盛んであり、またその応用の一つとして電気とのハイブリッド型としてバスに搭載された例もある。このようにガスタービンの技術の発展、用途の拡大は盛んである。今後もこれでおわることなく、是非ガスタービンの進歩に応じ内容の更新を、時をみて継続していただくことを本書に希望したい。ともあれ、本書は久しぶりに国内で発行された内容の新しい充実した教科書であり、関係の方々にも広く推薦する次第である。

(神奈川工科大学 柏原 康成)

## ガスタービンエンジン

(2000 年 10 月刊)

大きさ：B5 判 148 頁

価格：2,900 円 + 税

発行所：朝倉書店

住所：〒162-8707 東京都新宿区新小川 6-29

電話：03-3260-0141

FAX：03-3260-0180

URL：<http://www.asakura.co.jp>

## 訃 報

終身会員 齋藤 武君 86 才 平成 13 年 3 月 6 日逝去

ご遺族 札幌市中央区大通西 26-3-13 齋藤 洋子殿

謹んで哀悼の意を表します

## 第15回秋季講演会・見学会の報告

湯浅 三郎  
YUASA Saburo

第15回秋季講演会は、11月9日(木)に北九州市小倉地区の、港に面し船をデザインした北九州国際会議場に於いて開催され、翌日には日本鑄鍛鋼(株)の工場の見学会が行われた。参加者は学生12名を含め117名で、例年とほぼ同じで東京から離れるほど秋季の場所の魅力が増す現象を裏付ける結果となった。

講演会は、一般講演として圧縮機・翼列特性が8件、燃焼・燃焼器が8件、伝熱関係が4件、材料が6件、非定常計測が4件、ガスタービンシステムが7件の合計37件の発表が3会場であった。発表件数は例年と同程度であったが、ガスタービンシステムが比較的多いとの印象を持った。これは昨今のエネルギーの有効利用や二酸化炭素排出量削減問題の解決に、新しいガスタービンシステムで対処しようとする試みが多くなっていることを示唆しているのかも知れない。全般的にどの会場も活発な討論が行われており、途中で椅子を追加した会場もあって、会場の広さとセッションテーマとの兼ね合いが難しい。

特別講演では、シャボン玉石けん(株)社長の森田光徳氏に「環境と経営」と題して、無添加石鹼製造に至ったご自身の健康上の体験から始まって、合成洗剤が環境や身体等に与える影響や蟻・ネズミ・犬などが安全な食べ物を見極める本能的な賢さ、無添加石鹼・粉石鹼販売開始当時の世の中の環境認識とそのズレに伴う経営上の危機、その後の社会の変化や業績回復の過程など、我々を取り巻く自然・社会環境や人々の意識がここ25年で大きく変貌している、あるいはせざるを得ない状況を具体的に詳しくお話しいただいた。講演が終わる頃には会場の多くの聴衆がすっかり石鹼党になっているような雰囲気であった。

講演会終了後、国際会議場内のレストランに移動して懇親会が開かれた。伊藤会長の挨拶の後、日本鑄鍛鋼(株)の社長で1992年度のガスタービン学会の会長をなさった丹羽元会長の音頭による乾杯で参加者一同は歓談に入った。来年の秋季講演会は秋田市文化会館で10月に開催されるとの報告があったり、北九州の旨い物に少し舌鼓を打っている内に、酒はあるものの瞬く間に料理が底を尽き、中締めを機に三々五々と人が減っていった。ここ数回の講演会は、参加者数と料理との関係がバランスを崩しており、これらを正確に把握することが今後の懇親会の重要な課題の一つとなったようである。

翌10日(金)は晴天に恵まれた。見学会参加者は53名で、バスで市内戸畑地区にある日本鑄鍛鋼の工場へ向かった。この工場では大型の鑄鋼品と鍛鋼品とを生産している。

我々は、ガスタービンの翼車と火力・原子力発電所の蒸気タービン一体型軸の製造過程、すなわち製鋼・造塊、鍛造、予備熱処理、調質熱処理、機械加工の工程を中心に、広大な敷地内をバスで移動しながら詳しく見せていただいた。特にこの工場の技術が優れているのは、素材に含まれるリンや硫黄などの不純物及び水素や酸素などガス成分が極めて少ない500トンもの高品質な鋼塊を造れること(リン:3ppm, 硫黄:0.5ppmレベル)と、この塊を8000トンプレスを縦横に操って鍛錬・成形し、空隙がなく均一な微細結晶の製品に仕上げられることである。実際、25万kWクラスの発電所の蒸気タービン低圧ローター用の1250℃に加熱された直径1.5m、長さ7mの鋼塊が、目の前で太い鎖に吊り下げられ、巨大な斧によっていとも簡単に真っ赤な巨大な粘土細工のように加工用の溝が作られていく様は、実に圧巻であった。これほど大きな単一軸の製造技術は我が国にしかなく、しかもこの工場は100万kW級の低圧ローターが一体加工できる能力があるとのことであった。しかし丹羽社長によると、最近はこのような大型の発注はガスタービンのコンバインド発電システムの普及によって少なくなっているとのコメントがあり、ガスタービンの研究・開発に係わるものとしては複雑な心境であった。

工場見学後、かつては本州や大陸との連絡船で賑わったであろう門司港のレトロ地区を散策し、続いて源平の合戦で有名な壇ノ浦・田ノ浦を一望できるめかり公園に向かった。そこで、日本鑄鍛鋼(株)発行の資料「壇ノ浦の合戦」(源平最後の戦いに関する極めて詳しい41ページの冊子。わざわざバスまで届けていただいた。)に基づいて、源平の海戦の様子の説明を受けた。淀み域や逆流を発生するような海岸の地形のため目まぐるしく変化する海流に翻弄され、驚き一喜一憂したであろう武士たちの様子が目に浮かんだ。ガスタービンの流れ場に日々格闘している(?)我々であれば海流の適切な判断ができたであろうか等と考えてしまった。その後小倉に戻って小倉城址にある松本清張記念館に立ち寄り、広範囲で多岐な創作活動を続けた作家の生涯を観覧し、その膨大な仕事量に少なくとも私は圧倒された。最後は小倉駅で解散となり、帰路に就いた。

今回の秋季講演会は、天候にも恵まれ参加者も多く、全体としては順調であった。なお見学工場等では丹羽社長を始め日本鑄鍛鋼の方々に大変お世話になった。この場を借りてお礼申し上げます。

(東京都立科学技術大学・学術講演会委員会委員長)

社団法人 日本ガスタービン学会  
会 長 伊藤源嗣

## 社団法人 日本ガスタービン学会 平成 13 年度通常総会 および名誉会員推薦状授与式 開催ご案内

拝啓 時下益々ご隆盛のこととお喜び申し上げます。  
社団法人日本ガスタービン学会も会員各位のご協力で順調に発展を続けております。

さて、このたび第 26 期に入るにあたり下記により通常総会および名誉会員推薦状授与式を開催致しますので、ご多用中誠に恐縮ですが、ご出席頂きますようお願い申し上げます。

なお、定款変更により、正会員の 1/2 以上の議決を必要としますので、やむなくご欠席の場合は、同封の委任状を必ずお送り下さるよう、重ねてお願い申し上げます。  
敬具

### 記

日 時：平成 13 年 4 月 10 日(火) 13:00~15:30

場 所：機械振興会館 6 階 67 号室

東京都港区芝公園 3-5-8 (TEL 03-3434-8211)

地下鉄 日比谷線「神谷町」下車徒歩 7 分

バ ス 東京タワー前下車

### 第 26 期 (平成 13 年度) (13:00—15:00)

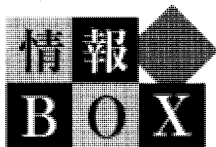
- 1 号議案：定款一部修正の件
- 2 号議案：細則一部修正の件
- 3 号議案：第 25 期 事業報告の件
- 4 号議案：第 25 期 決算報告の件
- 5 号議案：名誉会員推薦の件
- 6 号議案：第 26 期 事業計画の件
- 7 号議案：第 26 期 予算の件
- 8 号議案：第 26 期 役員選出の件
- 9 号議案：第 27 期事業計画及び予算案の文部科学省提出に係る審議手続きの件

### 名誉会員推薦状授与式 (15:10—15:30)

1. 名誉会員推薦状および記念品贈呈
2. 名誉会員挨拶

以上

出欠のご返事は、先にお送りした返信用葉書または添付 FAX 用紙にて、必ず事務局まで送付下さい。



### ISROMAC-9 論文募集中

9 th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-9), Honolulu, Hawaii, February 10-14, 2002, アブストラクト締切は 2001 年 4 月 1 日, 詳細は, <http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/isromac9>, 又は大阪大学辻本良信教授 [tujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp](mailto:tujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp) まで

「金属材料技術研究所を中心に進められている新世紀耐熱材料プロジェクトで開発した Ni 基単結晶超合金 2 種 (TMS-75, TMS-82+) のガスタービン実機による回転検証試験を平成 12 年 12 月より

東芝京浜事業所内の 15 MW 試験ガスタービンにて開始。」

(URL: <http://www.nrim.go.jp:8080/open/usr/harada/htm21-j.html>)

### 「高効率ガスタービン」「ファインセラミクス」プロジェクトの追跡評価

産業技術審議会評価部会において、国の研究開発プロジェクトとして実施された「高効率ガスタービン」(1978 年~1987 年) および「ファインセラミクス」(1981 年~1992 年) についての追跡評価が実施され、昨年末に報告書がまとまった。これらのプロジェクトの成果が産業・社会に与えたインパクトを明らかにし、今後実施されるプロジェクトの企画・運営方法、フォローアップ体制等の改善に資することを目的としている。

社団法人 日本ガスタービン学会  
会 長 伊藤源嗣

## 社団法人 日本ガスタービン学会 平成 13 年度通常総会 および名誉会員推薦状授与式 開催ご案内

拝啓 時下益々ご隆盛のこととお喜び申し上げます。  
社団法人日本ガスタービン学会も会員各位のご協力で順調に発展を続けております。

さて、このたび第 26 期に入るにあたり下記により通常総会および名誉会員推薦状授与式を開催致しますので、ご多用中誠に恐縮ですが、ご出席頂きますようお願い申し上げます。

なお、定款変更により、正会員の 1/2 以上の議決を必要としますので、やむなくご欠席の場合は、同封の委任状を必ずお送り下さるよう、重ねてお願い申し上げます。  
敬具

### 記

日 時：平成 13 年 4 月 10 日(火) 13:00~15:30

場 所：機械振興会館 6 階 67 号室

東京都港区芝公園 3-5-8 (TEL 03-3434-8211)

地下鉄 日比谷線「神谷町」下車徒歩 7 分

バ ス 東京タワー前下車

### 第 26 期 (平成 13 年度) (13:00—15:00)

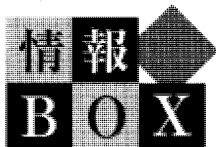
- 1 号議案：定款一部修正の件
- 2 号議案：細則一部修正の件
- 3 号議案：第 25 期 事業報告の件
- 4 号議案：第 25 期 決算報告の件
- 5 号議案：名誉会員推薦の件
- 6 号議案：第 26 期 事業計画の件
- 7 号議案：第 26 期 予算の件
- 8 号議案：第 26 期 役員選出の件
- 9 号議案：第 27 期事業計画及び予算案の文部科学省提出に係る審議手続きの件

### 名誉会員推薦状授与式 (15:10—15:30)

1. 名誉会員推薦状および記念品贈呈
2. 名誉会員挨拶

以上

出欠のご返事は、先にお送りした返信用葉書または添付 FAX 用紙にて、必ず事務局まで送付下さい。



### ISROMAC-9 論文募集中

9 th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-9), Honolulu, Hawaii, February 10-14, 2002, アブストラクト締切は 2001 年 4 月 1 日, 詳細は, <http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/isromac9>, 又は大阪大学辻本良信教授 [tujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp](mailto:tujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp) まで

「金属材料技術研究所を中心に進められている新世紀耐熱材料プロジェクトで開発した Ni 基単結晶超合金 2 種 (TMS-75, TMS-82+) のガスタービン実機による回転検証試験を平成 12 年 12 月より

東芝京浜事業所内の 15 MW 試験ガスタービンにて開始。」

(URL: <http://www.nrim.go.jp:8080/open/usr/harada/htm21-j.html>)

### 「高効率ガスタービン」「ファインセラミクス」プロジェクトの追跡評価

産業技術審議会評価部会において、国の研究開発プロジェクトとして実施された「高効率ガスタービン」(1978 年~1987 年) および「ファインセラミクス」(1981 年~1992 年) についての追跡評価が実施され、昨年末に報告書がまとまった。これらのプロジェクトの成果が産業・社会に与えたインパクトを明らかにし、今後実施されるプロジェクトの企画・運営方法、フォローアップ体制等の改善に資することを目的としている。

第26期(平成13年度)監事・評議員・役員候補者選挙結果

・監事 (氏名:五十音順・敬称略)		動務先		動務先		動務先		
番号	氏名	動務先	番号	氏名	動務先	番号	氏名	
1	菅 進	元, 船舶技術研究所	31	杉山 勝彦	(株)豊田中央研究所	66	三卷 利夫	電力中央研究所
2	野田 廣太郎	野田技術士事務所	32	加藤 利夫	(株)新潟鉄工所	67	伊藤 高根	東海大学
・評議員 (候補者番号順・敬称略)			33	吉岡 俊彦	日本航空(株)	68	荒川 忠一	東京大学
番号			34	熱田 正房	(株)日立製作所	69	梶 昭次郎	東京大学
氏名			35	大田原 康彦	(株)日立製作所	70	長島 利夫	東京大学
1	佐々木 直人	(株)アイ・エイチ・アイ・エアロスペース	36	川池 和彦	(株)日立製作所	71	吉識 晴夫	東京大学
2	川嶋 鏡裕	石川島播磨重工業(株)	37	中村 昭三	(株)日立製作所	72	湯浅 三郎	東京都立科学技術大学
3	永野 進	石川島播磨重工業(株)	38	大庭 康二	日立造船(株)	73	酒井 俊道	東京理科大学
4	真家 孝	石川島播磨重工業(株)	39	吉川 修平	富士電機ガスタービン研究所	74	本阿弥 眞治	東京理科大学
5	三堀 健	石川島播磨重工業(株)	40	小泉 忠夫	三井造船(株)	75	竹野 忠夫	名古屋大学
6	渡辺 康之	石川島播磨重工業(株)	41	高木 俊幸	三井造船(株)	76	田辺 清	日本航空機エンジン協会
7	井上 良夫	石川島汎用機械(株)	42	青木 素直	三菱重工(株)	77	水木 新平	法政大学
8	井口 和春	(株)佳原製作所	43	塚越 敬三	三菱重工(株)	78	荒木 達雄	武蔵工業大学
9	一本松 正道	大阪ガス(株)	44	稲植 毅夫	三菱重工(株)	79	大田(吉岡)英輔	早稲田大学
10	岩本 敏昭	川崎重工業(株)	45	長谷川 清	三菱重工(株)	80	山本 勝弘	早稲田大学
11	江田 武司	川崎重工業(株)	46	福江 一郎	三菱重工(株)	次点者		
12	杉本 隆雄	川崎重工業(株)	47	船崎 健一	岩手大学	1	樋口 新一郎	(株)トヨタタービンアンドシステム
13	森 建二	川崎重工業(株)	48	三宅 裕	大阪大学	2	佐々木 祥二	トヨタ自動車(株)
14	山下 直之	関西電力(株)	49	筒井 康賢	機械技術研究所	3	亀本 喬司	横浜国立大学
15	中西 章夫	九州電力(株)	50	濱 純	機械技術研究所	投票数		
16	弘松 幹雄	(株)先進材料利用ガスジェネレーター研究所	51	井上 雅弘	九州大学	955 票	評議員	監事
17	野村 卓三	全日本空輸(株)	52	速水 洋	九州大学	有効票	926	868
18	秋田 隆	ターボシステムズユニテッド(株)	53	鈴木 健二郎	京都大学	無効票	22	72
19	長谷川 好道	ダイハツディーゼル(株)	54	手島 清美	京都大学	白票	7	15
20	大原 久宜	中部電力(株)	55	原田 広史	金属材料技術研究所	選挙管理委員長 河田 修		
21	毛利 邦彦	電源開発(株)	56	長島 昭	慶応義塾大学	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
22	庄司 不二雄	東京ガス(株)	57	益田 重明	慶応義塾大学	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
23	土屋 利明	東京電力(株)	58	遠藤 征紀	航空宇宙技術研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
24	古瀬 裕	東京電力(株)	59	齋藤 喜夫	航空宇宙技術研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
25	飯田 義亮	(株)東芝	60	田丸 卓	航空宇宙技術研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
26	和泉 敦彦	(株)東芝	61	林 茂	航空宇宙技術研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
27	小林 正	(株)東芝	62	吉田 豊明	航空宇宙技術研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
28	檜佐 彰一	(株)東芝	63	山根 隆一郎	航空宇宙技術研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
29	松田 健	(株)東芝	64	藤網 義行	国土館大学	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		
30	青木 康芳	東北電力(株)	65	新田 明人	超音速輸送機用推進システム技術研究組合 電力中央研究所	先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。		

選挙管理委員長 河田 修

先般第26期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。

## 平成 13 年度第 1 回見学会のお知らせ

平成 13 年度の見学会を下記の要領で開催いたします。  
今回は航空用および自動車用精密部品の設計および加工  
について見学しますので奮ってご参加下さい。

## 1. 見学先

アイコクアルファ株式会社  
愛知県中島郡祖父江町字森上字本郷

## 2. 見学内容

航空機部品 5 軸加工, および航空機エンジン部品の加工,  
省力機械, CATIA による三次元設計等

## 3. 日 時

平成 13 年 5 月 18 日(金)13:00~15:30

## 4. スケジュール

12:30 名鉄森上駅に集合  
13:00~13:30 会社説明  
13:30~14:50 自動車部品工場, 航空機工場, 省力  
機械 見学  
14:50~15:20 CATIA による三次元 CAD/CAM  
デモ

15:20~15:30 質疑応答

15:30 頃 解散

## 5. 参加要領

- (1) 定員: 30 名 (学会会員に限る。定員超過の場合は抽選を行い, 結果は全員にお知らせします。)
- (2) 申し込み方法: 下記の申込書にご記入のうえ, 4 月 18 日(木)までに FAX, 郵送または e-mail にて学会事務局へお送り下さい。
- (3) 参加費: ¥3,000
- (4) 交通手段

(JR 利用の場合)

JR 名古屋駅から東海道本線に乗り, 尾張一宮駅で下車, 駅がつながっている名鉄新一宮駅にて尾西線に乗り換え, 森上駅で下車。

(名鉄利用の場合)

名鉄新名古屋駅から新岐阜行きに乗り, 新一宮駅にて下車, 尾西線に乗り換え森上駅で下車。

・いずれのルートでも名古屋から 35 分程度。

## 見学会参加申込書

申込締切日 (2001 年 4 月 18 日)

開 催 日 (2001 年 5 月 18 日)

(社)日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095 E-mail: gtsj@pluto.dti.ne.jp

氏 名			
勤 務 先			
勤 務 先 住 所	〒		
T E L		F A X	
連 絡 先	〒		
E-mail			

## 第7回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

近年ガスタービン技術の発展には目ざましいものがあります。航空機に搭載されるジェットエンジンをはじめ大規模発電やコージェネレーション用としても用途が広がっております。また、ガスタービンは高効率であること、NOx 排出を抑えることが比較的容易である等の理由で、環境に優しい原動機として、将来の人類のエネルギー問題に寄与する大変重要な役割を担っております。

一方、ガスタービンはまだまだ発展途上にあると言われており、高効率化・大容量化等多岐にわたる研究・開発分野で若い技術者の活躍が期待される分野です。そのような状況下で、学生及びガスタービン初心者技術者を対象とした標記シンポジウムの開催を計画しました。会員・非会員を問わず積極的にご参加下さい。

1. 日 時：平成 13 年 7 月 5 日(木), 6 日(金)
2. 場 所：関西電力(株) 姫路第一発電所  
兵庫県姫路市飾磨区中島 3058 番 1  
(山陽電車「姫路駅」より特急で約 5 分、  
飾磨下車、飾磨駅から市バスで約 10 分)  
参考：ひかり 143 東京(7:45)-姫路(11:23)
3. プログラム：
  - 5 日(木)12:30～ 受付
  - 13:00～14:30 「ガスタービン概論」  
竹矢一雄 (元徳島大学)
  - 14:30～15:00 休憩等
  - 15:00～17:00 関西電力(株)姫路第一発電所  
5・6 号機見学  
(1300℃ 級コンバインドサイクルプラント)
  - 17:30～19:30 懇親会
  - 6 日(金)9:00～10:30 「ガスタービンと流体工学」  
青木素直 (三菱重工)

- 10:30～12:00 「ガスタービンと伝熱工学」  
石田克彦 (川崎重工)
- 12:00～13:00 昼食
- 13:00～14:30 「ガスタービンと燃焼工学」  
北嶋潤一 (川崎重工)
- 14:30～16:00 「ガスタービンと材料工学」  
河合久孝 (三菱重工)
- 16:00～16:15 アンケート記入
- 16:20 閉会

4. 定 員：70 名 (定員超過の場合は抽選)
5. 対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ガスタービン初心者の技術者
6. 参加費：学 生(会員:無 料, 非会員:¥ 3,000),  
社会人(会員:¥5,000, 非会員:¥10,500)  
(注) 当日入会可, 入会金¥500,  
年会費:学生会員 (¥2,500),  
正 会 員 (¥5,000)
7. 懇親会：参加費 有料 (¥3,000)  
◎会場付近は工場地域のため昼食をとる場所がございません。昼食を御持参頂くか、弁当の予約(¥1,000 程度)をお願いします。

申込み：下記の申込書に 1) 所属 学校名(専攻, 学年), 社名(部課名, 入社年度), GTSJ 会員は会員番号, 2) 氏名, 3) 連絡先住所, TEL, FAX, E-mail, 4) 懇親会参加の有無, 5) 昼食予約の有無を明記し, 学会事務局宛に, 郵送, ファクシミリ, 電子メールのいずれかにより平成 13 年 6 月 8 日(金) (必着) までに, お申し込み下さい。

注：開催場所案内図等の詳細については当学会ホームページをご覧ください。

(<http://www.soc.nacsis.ac.jp/gtsj/>)

### 第7回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(平成 12 年 7 月 5, 6 日)

(社)日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095 E-mail: gtsj@pluto.dti.ne.jp

氏 名		懇親会	出 欠	昼食予約	7/5	7/6
所 属			学年, 入社年度			
連 絡 先	〒					
電 話		GTSJ 会員番号 (No. )			非会員	
ファクシミリ		E-mail アドレス				

申込締切日：平成 13 年 6 月 8 日(金) (必着)

## 第 29 回ガスタービン定期講演会・開催のお知らせ

日本ガスタービン学会（幹事学会）と日本機械学会の共催による第 29 回ガスタービン定期講演会を東京で開催します。多数の会員の方々の参加をお願いいたします。

**開催日時** 2001 年 6 月 1 日(金), 9:40~17:35

**開催場所** 東京都立科学技術大学  
科学技術交流センター  
(東京都日野市旭ヶ丘 6-6)

- 講演プログラムは本号に掲載されています。
- 講演会終了後に、講演会場にて懇親会を開催します。  
参加登録者は無料ですので、お気軽にご参加ください。  
参加登録費（講演論文集代金を含む）  
共催学会正会員 7,000 円  
同 学生会員 3,000 円  
会 員 外 14,000 円  
ただし、学生に限り論文集無しで 1,000 円で参加できます。

### 参加申込方法

巻末添付申込書に(1)氏名, (2)所属学会・会員番号・会員資格, (3)勤務先, (4)連絡先, (5)送金額・送金方法および送金予定日を記入し, 学会事務局宛にお送りください。講演者も参加登録をお願いします。当日の参加登録も受け付けます。

社名にて銀行送金される場合は, お手数でも送金日および送金内訳を電話または FAX にてご一報ください。

・郵便振替 No. 00170-9-179578

(社)日本ガスタービン学会

・銀行振込 第一勧業銀行西新宿支店

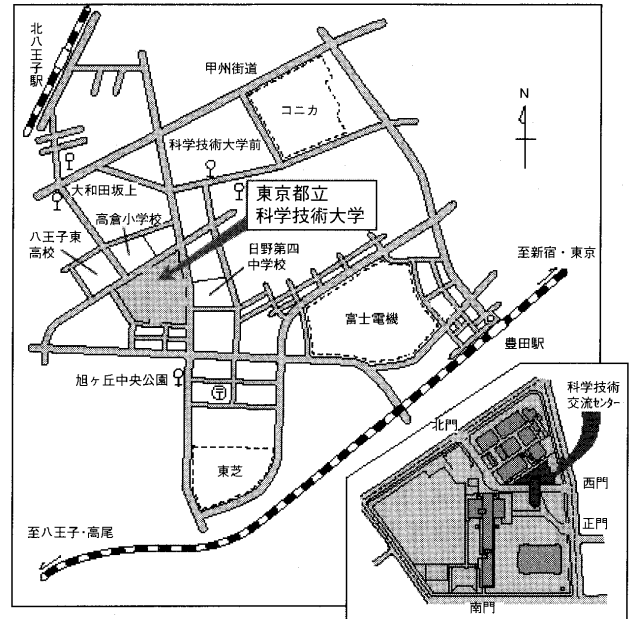
普通 No. 067-1703707 (社)日本ガスタービン学会

・現金書留

### 講演論文集

講演論文集は講演会当日, 会場でお渡しします。論文集のみをご希望の方は講演会終了後に残部を実費(3,000 円, 送料共)にて頒布いたしますので, 学会事務局までお問い合わせください。

### \* 講演会場案内



### \* 交通案内

- (1) JR 中央線豊田駅を利用の場合  
(JR 新宿駅から快速にて約 45 分)

a) 京王バス (北口バス停)

① 平山工業団地行にて約 10 分

旭ヶ丘中央公園下車徒歩 5 分

□ 豊田駅北口→中央公園前

\* ③ 番乗り場, 平山工業団地行 (豊 41)

時間								
8	01	08	14	21	28	35	45	57
9		08		19	29			53

□ 中央公園前→豊田駅北口

時間							
17	01	13	22	34	46	58	
18		11	24	34	46	58	
19		09	19	30	40	51	
20	01	12	22	31	42	52	

② 八王子駅北口行にて約 10 分

都立科学技術大学入口下車, 徒歩 7 分

b) タクシーにて約 5 分, 又は徒歩 25 分

- (2) JR 中央線八王子駅または京王線京王八王子駅を利用の場合 (京王新宿駅から特急にて約 45 分)

a) 京王バス (いずれの駅も北口バス停)

豊田駅北口行又は日野駅行にて約 15 分

大和田坂上下車徒歩 8 分, 約 10 分間隔で運行

b) タクシーにて約 10 分



# 第 29 回ガスタービン定期講演会（都立科技大）プログラム

（一般講演 講演時間 20 分 討論 5 分，\*印 講演者，連名者の所属が省略されている場合は後者と同じです）

第 1 室		第 2 室	
9:40	<p>《一般講演》翼列特性 座長:野崎 理(航技研)</p> <p>A-1 近似二次元翼列における衝撃波変動現象の研究 (計算と実験との比較) *比良木雅志(都立科技大院), 松下政裕(航技研), 白鳥敏正, 桜井忠一(都立科技大)</p> <p>A-2 遷音速軸流圧縮機における動翼ウエイクの静翼通過による減衰 *野原隆樹, 今成邦之, 大庭芳則, 藤井 功(石川島播磨)</p> <p>A-3 高亜音速流中における剥離を伴う二重円弧翼列の非定常空力特性 *青塚瑞穂, 渡辺紀徳, 町田保男(東大院)</p>	9:40	<p>《一般講演》燃焼器 I 座長:井亀 優(船舶技研)</p> <p>B-1 二酸化炭素回収対応循環型ガスタービンにおける未燃焼成分の反応試算 *江原拓未(NEDO), 壹岐典彦, 濱 純(機械研)</p> <p>B-2 過濃予混合火炎を用いた超小型水素ガスタービン用試験燃焼器の火炎安定特性 *皆川和大, 杉山 怜(都立科技大院), 湯浅三郎(都立科技大)</p> <p>B-3 極超小型ガスタービン用微小水素予混合火炎の安定性 *天日洋二(都立科技大院), 湯浅三郎(都立科技大)</p>
10:55	<p>《一般講演》空力 座長:松田 寿(東芝)</p> <p>A-4 翼形状の最適設計 — 2次元タービン翼形状について— *永根浩平, 新関良樹, 福山佳孝, 佐々木隆(東芝)</p> <p>A-5 遠心圧縮機羽根車における翼端漏れ流れの挙動 *才木一寿(九大院), 古川雅人(九大), 井上雅弘(九大), 張春暉(九大院), 茨木誠一, 東森弘高(三菱重工)</p> <p>A-6 UPACS のターボ機械流れへの適用 *山本一臣, 山根 敬, 岩宮敏幸, 野崎 理(航技研), 児玉秀和(石川島播磨)</p>	10:55	<p>《一般講演》燃焼器 II 座長:壹岐典彦(機械技研)</p> <p>B-4 ESPR 低 NOx 燃焼器の LPP 燃料ノズルの開発 (シングルセクタ燃焼器試験結果) *木下康裕, 小田剛生, 木村武清(川崎重工)</p> <p>B-5 LNG・酸素焼き燃焼器の開発 (CO<sub>2</sub> 回収対応クローズドサイクルガスタービン用燃焼器の開発) *井上 洋, 小金沢知己, 小林成嘉(日立)</p> <p>B-6 高温高圧条件下における低 NOx 航空用ガスタービン燃焼器の性能 *池崎隆司, 藤 秀実, 細井 潤(AMG), 藤森俊郎(石川島播磨)</p>
11:05		11:05	
12:20	<p>《特別講演》 「マイクロガスタービンの現状と展望 (仮題)」 吉識晴夫氏 (東京大学 生産技術研究所) 座長:湯浅三郎 (都立科技大)</p>	12:20	
13:20		13:20	
14:20		14:20	
14:30	<p>《一般講演》材料 座長:丸井英史(佐原総研)</p> <p>A-7 Ni/Cu 系傾斜機能材料の熱物性値評価(その 2) *吉田豊明, 藤沢良昭(航技研), 犬飼隆夫(東芝)</p> <p>A-8 高圧力過給機の開発における強度評価 (第 2 報 翼振動に及ぼすタービンスクロールの影響) *岩城史典(石川島播磨), 小幡正一(金沢工大), 三堀 健, 田口英俊, 知野千年(石川島播磨)</p> <p>A-9 カーボンポリイミド静翼のニアネットシェイプ成形 *染谷佳昭, 伊藤友裕, 柿木伸介(AMG)</p>	14:30	<p>《一般講演》燃焼器 III・伝熱 座長:稲毛真一(日立)</p> <p>B-7 低 NOx 燃焼器の不安定燃焼防止制御の研究 *有賀宣仁, 今村 亮(AMG), 市村修太郎(川崎重工)</p> <p>B-8 触媒燃焼ガス流中における拡散火炎に関する研究 *新矢 剛, 岩堀展夫(慶大院), 川口 修(慶大理工)</p> <p>B-9 波状壁上下での噴き出し空気の熱流体的挙動 *船崎健一(岩手大工)</p>
15:45		15:45	
15:55	<p>《一般講演》マイクロガスタービン及びガスタービンシステム 座長:今成邦之(石川島播磨)</p> <p>A-10 水素吸蔵合金を用いた水素ガスタービン用排熱利用型燃料供給装置の研究開発 *朝日雅博(都立科技大院), 湯浅三郎(都立科技大)</p> <p>A-11 マイクロガスタービンガス供給系統における脈動現象とその対策 *庄田成志, 金子成彦, 渡邊辰郎, 猪股 仁(東大院)</p> <p>A-12 マイクロガスタービン状態監視・制御システムの試作 *猪股 仁, 金子成彦, 渡邊辰郎, 庄田成志(東大院)</p> <p>A-13 28 kW マイクロガスタービンの性能評価試験 笠木伸英, 浜名芳晴(東大工), *奥田英信(東大院), 三輪潤一(東大), 君島真仁(東大工)</p>		
17:35			

\*講演会にあわせて都立科学技術大学のターボジェットエンジンあるいはロケットエンジンの運転及び遷・超音速風洞の実験等の見学を予定しています。詳細は当日お知らせいたします。

# 第29回ガスタービン定期講演会

(平成13年6月1日)

## 参加申込書

(社) 日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095

会社名	
所在地	〒
TEL	
FAX	

参加者名 (所在地、連絡先が所属により異なる場合には、本用紙をコピーして別シートにご記入ください。)

フリガナ 氏名	所属	TEL FAX	所属学協会 (GTSJは会員番号)	懇親会
				出席 欠席
				出席 欠席
				出席 欠席
				出席 欠席
				出席 欠席

### 【事務局への連絡事項】

払込方法 (○印をつけてください) 参加費入金予定日 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

- 銀行 (第一勧業銀行西新宿支店 普通預金1703707)
- 郵便振替 (00170-9-179578)
- 現金書留

当日支払は原則として受け付けません。

(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

\*請求書の発行について

1. 要 宛名 ( ) 2. 不要

\*領収書の発行について

1. 要 宛名 ( ) 2. 不要

# 編集 後記

3月号「モニタリング技術」小特集をお届けします。

論説・解説としては、2年ほど前に設立されたモニタリング委員会の調査研究結果が纏まったことを受けて、「モニタリング技術」として4編に分けて紹介して頂きました。エンジンの制御だけでなく、分散型電源の遠隔監視にも関わる技術であり、注目すべき分野ではないかと考えられます。非常に幅の広い分野に亘っていますが、内容的には要領よく全体を理解して頂けるのではないかと思います。

次に、現在、ナショナルプロジェクトの一つとして活発に研究開発が進んでいる「スーパーマリンガスタービンの研究開発」において、ほぼ要素研究が終了したことを受けて、その成果の一部をご紹介します。二軸型並びに一軸型再生サイクルガスタービンが開発対象となっており、サイズは異なるもののマイクロガスタービンなどとも共通な要素も含まれ、興味深い内容となっています。

「論説・解説」の最後として、航空宇宙技術研究所の山本氏のご協力により、隣国、中国でのガスタービン開発に関する活動状況の紹介記事を掲載することが出来ました。当学会では、国際化の一環としてアジアでの活動を広げようと検討しているところでもあり、今後とも関係者のご協力をお願いしたいと思います。

ガスタービン基礎講座は、一月号の「ガスタービンと制御工学」の2回目をもって終了したため、今月号はあ

りません。これに替わる企画を編集委員会で検討中です。ご希望、ご意見をお寄せいただければ幸いです。

「喫茶室」も6回目を迎えました。どうしても硬くなりがちな学会誌を少しでも読みやすく、親しみやすい雑誌になればと言う編集委員会の期待に応じて頂いた企画ですが、読者の皆さんをはじめ、OBの方々の応援を頂きたいと思っています。

最後に、今月号発行に当たってご多忙中の折り、ご執筆頂いた方々に心より御礼申し上げます。なお、本号の編集には、伊東委員(株東芝)、飯島委員(株日立製作所)、西村委員(三菱重工業株)と高木(三井造船株)の4名にて担当致しました。

(高木 俊幸)

## 〈表紙写真〉

### 予混合式低 NOx 燃焼器

説明：この写真は1984年東北電力(株)殿東新潟火力発電所の第3号系列(6台)に納入された世界初の予混合式低 NOx 燃焼器を示す。従来の拡散燃焼器と異なり、蒸気ならびに水噴射なしで低 NOx を実現する当時としては画期的なものであり、運開以降16年間に渡りベース負荷機の心臓部として活躍している。

(三菱重工業株 高砂製作所)

だより

## ♣事務局 〆

今年春暖冬といわれていたにもかかわらず、東京は何度も雪に見舞われました。

そんななか、1月末に事務局のパソコンがこわれて大騒ぎというハプニングもありましたが、例年より一ヶ月早い年度末に向け、事務局一同張り切っています。

早いもので、今年度最初(ちょっと実感がわきません)の事務局だよりです。

今年度は通常業務のみならず、次期の国際会議や学会30周年にむけての準備が始まることでしょう。

また、4月10日の通常総会には、今年度より文部科学省の指導により定款変更をしたため、正会員の2分の1の出席者と委任状を集めなければならなくなりました。

すでに皆様のお手元にお届けしていますが、委任状(ハガキ)を必ず、事務局あてご返送下さい。また、この学会誌にも委任状を同封いたしましたので、FAXでも結構ですから、ご返送お願いいたします。

もうひとつ、会員名簿作成のため、先日調査用紙を返送していただきましたが、まだ、時間的に間に合いますので、4月以降変更予定の方は、同封の総会委任状下にご記入の上ご返送ください。

またまた多いと予想される花粉と戦いながらの年度替りとなりそうです。

[A]

# 編集 後記

3月号「モニタリング技術」小特集をお届けします。

論説・解説としては、2年ほど前に設立されたモニタリング委員会の調査研究結果が纏まったことを受けて、「モニタリング技術」として4編に分けて紹介して頂きました。エンジンの制御だけでなく、分散型電源の遠隔監視にも関わる技術であり、注目すべき分野ではないかと考えられます。非常に幅の広い分野に亘っていますが、内容的には要領よく全体を理解して頂けるのではないかと思います。

次に、現在、ナショナルプロジェクトの一つとして活発に研究開発が進んでいる「スーパーマリンガスタービンの研究開発」において、ほぼ要素研究が終了したことを受けて、その成果の一部をご紹介します。二軸型並びに一軸型再生サイクルガスタービンが開発対象となっており、サイズは異なるもののマイクロガスタービンなどとも共通な要素も含まれ、興味深い内容となっています。

「論説・解説」の最後として、航空宇宙技術研究所の山本氏のご協力により、隣国、中国でのガスタービン開発に関する活動状況の紹介記事を掲載することが出来ました。当学会では、国際化の一環としてアジアでの活動を広げようと検討しているところでもあり、今後とも関係者のご協力をお願いしたいと思います。

ガスタービン基礎講座は、一月号の「ガスタービンと制御工学」の2回目をもって終了したため、今月号はあ

りません。これに替わる企画を編集委員会で検討中です。ご希望、ご意見をお寄せいただければ幸いです。

「喫茶室」も6回目を迎えました。どうしても硬くなりがちな学会誌を少しでも読みやすく、親しみやすい雑誌になればと言う編集委員会の期待に応じて頂いた企画ですが、読者の皆さんをはじめ、OBの方々の応援を頂きたいと思っています。

最後に、今月号発行に当たってご多忙中の折り、ご執筆頂いた方々に心より御礼申し上げます。なお、本号の編集には、伊東委員（㈱東芝）、飯島委員（㈱日立製作所）、西村委員（三菱重工業㈱）と高木（三井造船㈱）の4名にて担当致しました。

（高木 俊幸）

## 〈表紙写真〉

### 予混合式低 NO<sub>x</sub> 燃焼器

説明：この写真は1984年東北電力㈱殿東新潟火力発電所の第3号系列（6台）に納入された世界初の予混合式低 NO<sub>x</sub> 燃焼器を示す。従来の拡散燃焼器と異なり、蒸気ならびに水噴射なしで低 NO<sub>x</sub> を実現する当時としては画期的なものであり、運開以降16年間に渡りベース負荷機の心臓部として活躍している。

（三菱重工業㈱ 高砂製作所）

だより

## ♣事務局 ㊟♣

今年春暖冬といわれていたにもかかわらず、東京は何度も雪に見舞われました。

そんななか、1月末に事務局のパソコンがこわれて大騒ぎというハプニングもありましたが、例年より一ヶ月早い年度末に向け、事務局一同張り切っています。

早いもので、今年度最初（ちょっと実感がわきません）の事務局だよりです。

今年度は通常業務のみならず、次期の国際会議や学会30周年にむけての準備が始まることでしょう。

また、4月10日の通常総会には、今年度より文部科学省の指導により定款変更をしたため、正会員の2分の1の出席者と委任状を集めなければならなくなりました。

すでに皆様のお手元にお届けしていますが、委任状（ハガキ）を必ず、事務局あてご返送下さい。また、この学会誌にも委任状を同封いたしましたので、FAXでも結構ですから、ご返送お願いいたします。

もうひとつ、会員名簿作成のため、先日調査用紙を返送していただきましたが、まだ、時間的に間に合いますので、4月以降変更予定の方は、同封の総会委任状下にご記入の上ご返送ください。

またまた多いと予想される花粉と戦いながらの年度替りとなりそうです。

[A]

## 学会誌編集規定

1996.2.8改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
  - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
  - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
  - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事(報告、会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報(研究速報、技術速報)、寄書(研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介)、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報欄記事	1/2ページ

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。
8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合、文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先  
〒105-0003 東京都港区西新橋1-17-5  
Tel. 03-3508-9061 Fax. 03-3580-9217  
ニッセイエプロ(株) 制作部デジタル編集課  
E-mail: degihen@magical3.egg.or.jp  
学会誌担当 佐藤孝憲

## 技術論文投稿規定

1997.1.28改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
  - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、著者が外国人会員であって日本語による論文執筆が困難な場合は英語による投稿を認める。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

### 日本ガスタービン学会誌

Vol. 29 No. 2 2001. 3

発行日 2001年3月20日

発行所 社団法人日本ガスタービン学会

編集者 益田重明

発行者 伊藤源嗣

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13  
第3工新ビル402

Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387

郵便振替 00170-9-179578

印刷所 ニッセイエプロ(株)

〒105-0003 東京都港区西新橋2-5-10

Tel. 03-3501-5151 Fax. 03-3597-5717

©2001, (株)日本ガスタービン学会

### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

学術著作権協会

TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619

E-mail: kammori@msh.biglobe.ne.jp