

## ガスタービンとの出会い

辻 高弘<sup>\*1</sup>  
TSUJI Takahiro

私のガスタービンとの最初の出会いは昭和24年で、石川島芝浦タービン(株)、現在の(株)東芝に入社して4年目、当時の鉄道研究所・一号ガスタービンの試運転が、工場の一角で実施されており、主としてこれをサポートするための専任グループができ、その一員になった時である。このガスタービンは上記石川島芝浦タービン(株)が戦争中に海軍の高速魚雷艇用主機として製作し、試運転に入ったところで終戦、そのままにされていたものを、昭和23年鉄道研究所が試験用ガスタービンとして購入、整備・試運転に入っていたもので、一軸、2200 PS、タービン入口温度 650°C であった。この試運転中に、燃焼器(空気圧縮機の両側斜め下に2缶取り付けられていた)の中に漏れ溜まっていた燃料に気が付かず起動し、加速中これに一度に着火、タービン入口温度計は振り切り、どうすることもできず、結局タービン静翼を焼損、特に高温ガスの流れたところはある幅ですこしスワールして完全に溶けてなくなっており、ガスはこのように流れるのかなーと感心したものであった。なおタービン動翼の材料はイ301と称する航空発動機の排気弁の材料であった。当時電力事情が悪く工場の操業にも支障をきたしていたので、当初水動力計で負荷をとっていたが、これを発電機に取り替え、買電から切り替え初めて照明がついた時の一瞬も、忘れられない思い出である。このガスタービンはその後現在の船舶技術研究所に移設され、現在も保管されている。その後いくつかのガスタービンの設計に携わってみて、戦時中にこのようなすばらしいガスタービンを設計された関係者、並びに終戦直後このような試験研究を計画実施された鉄道研究所の関係者に心から敬意を表するものである。<sup>(1),(2)</sup>

電力不足を補うため、将来の発展が期待されていたガスタービンによる自家発が計画され、出力2000 kWのガスタービンが設計・製作された。形式は、2軸空気予熱器付き、タービン入口温度は650°C。高圧系から出力を取るというユニークなものであった。このガスタービンの工場試運転のハンドルを握った筆者は、起動着火加速の過程で、燃料を増やしてもタービン入口温度が上がらずむしろ下がるような状態に初めて達し、ぐんぐん加速し

たときのあの感触は未だに私の手に残っている。このガスタービンは工場試運転が終わるや、かねてより丸善石油(株)より共同研究の申し入れがあり、電力事情も好転していたこともあり、これをお受けすることとなり、同社下津製油所に据え付け、試運転を開始したのは、昭和31年の初めであった。試運転に入るや、深刻な問題に直面した。起動中の回転上昇が遅く、起動モーターが加熱してアイドリングまでもって行けないのである。当初原因は工場運転の時使用していなかった空気予熱器の圧力損失のためと考え頭を抱えた次第であったが、工場運転は夏であり、現地は真冬であることに気づき、潤滑油を加熱したところ、うそのように回転上昇し、胸をなでおろしたのであった。当時滑油タンクにヒーターを設置することはまだ一般的ではなかった。そしてこのガスタービンは起動モーターが低圧側にあり、しかもその容量に余裕がなかったので、はからずもこんな貴重な経験することとなった。運転に入り最初のつまずきは燃焼器(単筒型)内筒の変形・焼損であった。当時の耐熱材料では解決できず、コの字型断面の短冊状の内筒片を、円周配列することで解決した。負荷試験に入り、低圧系の回転数が設計値より高くなり全負荷までに達しない。検討の結果高圧圧縮機の一段動静翼を取り外すこととした。計算の上ではこの方法しかないとの結論ではあったが、結果が出るまでは不安であった。昭和53年から始まったムーンライト計画の高効率ガスタービンの研究開発で試作した100 MWの2軸のガスタービンでも高圧系と低圧系のバランスを改善するために高圧圧縮機の一段動静翼を取り外した。2軸型の難しさの一端を示しているのであろうか。次にこのガスタービンの高圧タービンのローターの構造についてすこしふれよう。このローターは中央部と前後の心棒からなり、中央部のみを耐熱性の良いオーステナイト系の材料とし、前後の心棒はフェライト系の耐熱鋼とし、これをボルト締めにより結合した。当然熱膨張係数が異なるので、ボルトによる結合には細心の注意を払い、ラディアルピンを用い、心棒側の結合部にはフレキシビリティをもたせた。運転に入ってから点検の度に結合部の外径、振れなどをチェックしていた。変形は徐々に増加し、なかなか安定しない。そうしてある時間が経過してから、この変形の度合いが増加の傾向を示しだした。膨張差にばかり気をとられて

原稿受付 1996年12月10日

\*1 〒232 横浜市内南区中里4-12-16

いた心棒側結合部の回転による応力をもう一度検討したところ、結合部付近の温度が設計温度より少し高いことを考慮すると、クリープ強度一杯であることが分かり、クリープ変形が破断に近いところにきていてもおかしくないことが判明、直ちに運転を中止し、心棒側もオーステナイト系に替えてことなきを得た。最後に、燃料と翼の付着物について、丸善石油(株)の方がいろんな種類の燃料を準備されて、添加剤なども含め、さらに付着物の除去方法まで、多くの研究をして頂き貴重なデータを得ることができた。結論を一言で言えば、硫黄分と塩分の少ないものが付着の量も少なく、また付着物の除去も容易であるということであった。かくして、昭和45年まで同製油所の自家発として使用された。<sup>(3)</sup>

上記試運転が終わったところ、現在の航空宇宙技術研究所が、空気圧縮機の試験を行うための駆動機として、ガスタービンを計画された。別に設置されていた空気源設備から圧縮空気の供給を受け、これに燃焼器とタービンを設置するというもので、この注文を頂き、同研究所の方の一方ならぬご指導を得て、設計・製作を行った。タービン出力は2300 kW×2で、最高回転数12600 rpm、二台のタービンの高圧側を突き合わせる形とした。そしてタービン軸端の両側で供試圧縮機が駆動できるようにし、一方の軸端には捻れ角度を測定するトルクメータを設置したので、軸系が長くなり、軸受の数も多く、振動を心配したがが無事納入することができた。その後同じ形式の7500 kW×2のものも注文頂き、いろいろご指導を頂いた。心より研究所の関係者に感謝する次第である。

今までは、東芝の自主技術によるガスタービンについて述べてきたが、これからは、スイス、BBC社との技術契約により製作したガスタービンについて述べる。これらのガスタービンはすでに多くの運転実績を持っており、私達のこれまでの経験も加わり、最初から立派な結果を示した。昭和36年初号機出力6000 kWが運転に入った。長崎県の松島炭礦(株)大島礦業所に設置され、炭坑から出てくるメタンガス濃度約60%のガス燃料でガスタービンには最適の燃料であり、試運転およびその後の営業運転も順調であった。ただ空気予熱器付きで、負荷遮断の時の過速を抑えるために燃焼器の前に放風弁があり、加速度を検出して作動する形式で、回転数が整定するころに放風弁が閉まるが、条件によって、このために回転が上がり再び弁が開き、これを繰り返すこととなり、調整に少し苦労した。炭坑からのガスを燃料とした発電設備を北海道の住友石炭礦業(株)、三井石炭礦業(株)より注文を受け、その中にはBBC標準機より、タービン、圧縮機の周速を大きくしたものなどもあった。北海道に雪はつきものであるが、空気吸い込み口フィルターに付着する雪

をタービン排気を使用し融かそうとしたことが事故発生につながった。ある日突然一大音響と振動が発生しトリップしたとの連絡を客先より受けた。融けた水が圧縮機前置静翼に氷結し、サージングに入り、圧縮機動静翼を損傷した。電力計は逆電力側に大きく振れ、大ブレーキがかかったことを示しており、この程度の損傷で済んで良かったと思った次第であった。実はサージングについては、さらに次の苦い経験がある。昭和42、43年に韓国電力(株)に15 MWのガスタービンを10台納入したが、このガスタービンの試運転も進み、次々と営業運転に入っていた。そんなある日ある号機を起動していた。起動モータもすでに切り離し、順調に加速していたとき、異常は突然起きた。圧縮機の音が変わった。制御盤は抽気放風弁が閉まったことを警告している。まだ放風弁を閉める回転数ではない。圧縮機がサージングに入ったのだ。回転計を見るとどんどん加速している。放風弁の閉まる規定回転数まであとすこし。ここは加速あるのみと燃料を増加、サージングは治まった。圧縮機が頑丈だったため事故にはならなかったが、一步誤れば大事故につながるところであった。原因は放風弁の制御系のちょっとしたトラブルであった。

私は、その後ガスタービンの業務から一時期離れたが、昭和53年通産省ムーンライト計画・高効率ガスタービンの研究開発がスタートする時、高効率ガスタービン技術研究組合の常勤理事として参画することとなり、昭和63年まで勤めることとなった。

私のガスタービンとの出会いは、最初が昭和24年、2回目はBBCガスタービンであり、3回目がムーンライト計画であったといえよう。

新鋭火力発電所は殆どコンバインドで計画される今日を迎え、ガスタービンと長くつきあってきた私として、こんなに嬉しいことはない。1300°Cから1400°Cが実用機として採用され、次の目標は1500°Cと言われる時代を目の当たりにし、ガスタービンに関係されている各位のこれまでのご尽力に心から敬意を表するとともに、なお一層のご活躍と発展を心からお祈り致します。

以上で私の昔話を終わることと致します。貴重な紙面をこのようなお話しで使わせて頂いたことをお詫びし、また古いことであり、記述に思い違いがあるかもしれません。この点もお許し願いたいと存じます。

## 参考文献

- (1) 中田金市, 山内正男, 須之部量寛, 不破廣行 他, 鉄道業務研究資料, 7-17 (昭25-11)
- (2) 井口泉, REPT GTCJ, 3-12 (1976)
- (3) 不破廣行, 日本機械学会誌, 63-498 (昭和35-7)

## 特集「ターボチャージャ」

## — 特集にあたって —

中沢 則雄\*<sup>1</sup>  
NAKAZAWA Norio

会員の皆様には既に御承知の通り、ターボチャージャは本学会の活動の中の主要なテーマの一つであり、関連する学会員も多数を占めており、今回特集として取り上げることとしました。先回同様の特集を組んで以来約6年を経過し、ターボチャージャに求められているもの、またその対応技術の動向も変化してきており、過給エンジンシステムを含めそれらの開発と生産の第一線で直接かかわっておられる方々に執筆して頂きました。また最近の生産統計についても担当の委員の方にとりまとめをお願いしました。

ターボチャージャが始めて実用されたのは約70年前であり、その後軍用機の高空での高出力化の手段として大量生産され、その技術が初期のジェットエンジン開発のベース技術の一つとなったことはよく知られております。今日では小型乗用車用エンジンから大型の船用等のディーゼルエンジンの広範囲の用途にターボチャージャは採用され、高出力・高熱効率化および排出ガスのクリーン化による商品化の向上と環境保全に極めて重要な役割を果たしております。

1970年代後半にターボチャージャが自動車に採用されて以来、その生産台数は飛躍的に増大し特にディーゼル乗用車およびトラック・バスはますますその装着率が伸長する分野であります。厳しい排出ガス規制に対応しながら更なる性能向上を追求している過給エンジンの動向について自動車メーカー2社に、また広作動域にマッチングするとともに動的な特性向上が要求される自動車特有のターボチャージャ側の対応技術の動向について2社の方々に解説して頂きました。

船用および陸用のディーゼルエンジンにおいては過給の圧力比および総合効率は年々着実に向上し、排出ガスのクリーン化およびエンジン部分負荷性能向上についても、用途別に状況は異なるが対応技術開発が進められ、自動車用途と類似の手法も使われています。今後もエンジンの永遠の課題である小型・軽量・高性能化と排出ガスのクリーン化を進める上で、ターボチャージャ技術の向上が期待されています。エンジン出力約2000PSで区分して、大型と中小型に分け、エンジンシステムとター

ボチャージャの動向を2社の方々に解説頂きました。

ターボ機械の範疇の中でもターボチャージャは、自動車の規模での大量生産されているほぼ唯一の付加価値の高い機能単位を持つ組立品であり、性能と信頼性を確保しつつ厳しい価格競争の中で培われた粗材、加工、組立および品質管理のプロセスと手法が確立しています。一部の乗用車のターボチャージャのタービンローターにセラミック材料が適用され既に10年余りが経過しましたが、その間の材料面および生産技術の進歩についてセラミック材料メーカーの方々に執筆願いました。セラミック材料を高応力の主要構造部品に適用したパイオニアであり低コストの量産技術を確立し、今後の構造部品へのセラミック材料の適用拡大の大きなステップとなっています。それらの得られた技術が現在進められている自動車用および産業用セラミックガスタービン開発に貢献しています。

ガスタービンとターボチャージャは互いに技術の波及を図りながら発展してきた部分が幾つかあり、最近の動向として更に枠を広げたターボ機械全般への技術応用展開についてもターボチャージャ側から見たものについて解説を頂きました。

速度型機械であるターボチャージャを、回転数に対しほぼ一定のトルク特性を持つ容積型エンジンへ適用することは、エンジンの本来の特徴を失わせるものとして心配され、特に自動車用途にはその問題点に対応する技術開発が重点的に進められてきました。今日では各種新デバイスと新材料およびその組み合わせならびに電子制御技術の活用により、それらの問題点は大幅に改良され、またNOx等の排出ガス低減に効果的であることから、ターボチャージャがエンジンの商品力向上に果たす役割はますます増大しています。今後もガスタービンやターボチャージャの本来の技術レベルの向上とともに、より広い視野で他の分野の技術を吸収し、組合せ技術と境界の技術を伸ばしていくことも大切であり、本特集が多くの方々の参考になることを期待します。最後に、御多忙中にもかかわらず記事をお寄せ頂いた執筆者の皆様はじめ編集委員会の関係の方々の多大な御協力に厚く御礼申し上げます。

原稿受付 1997年2月6日

\* 1 三菱自動車工業㈱ 〒146 東京都大田区下丸子4-21-1

## 特集・ターボチャージャ

## 大型過給ディーゼルエンジンとターボチャージャの進展

松尾 栄人<sup>\*1</sup>,  
MATSO Eito高石 龍夫<sup>\*1</sup>  
TAKAISHI Tatsuo

## 1. まえがき

ディーゼル機関は、100年以上の歴史を持ち、熱効率が高いため小型から大型まで各種の用途に幅広く採用されている。しかし、小型・軽量・高出力のガスタービンに軍用や高速艇用主機の座を奪われ、近年の環境問題が加わり高速フェリーや客船用主機の座も独占できなくなりつつある。これに対してタンカーやコンテナ船用の低速船用機関では、高い運行経済性が要求されることからC重油、粗悪油を燃料とする高効率機関として今後とも大型ディーゼル機関が使われるものと考えられる。このような大型ディーゼル機関を自主開発できるメーカは、MAN・B & W社、Sulzer社、三菱重工業(株)の3社に集約され、Sulzer社のディーゼル部門はWartsila社に買収されている。6000 TEUのコンテナ船用の超大型ディーゼル機関の開発が前記の2社で進められている。また、各社とも信頼性向上から高出力化へとその開発の主力を向けつつある。大型ディーゼル機関は、既に熱効率50%を達成しており、この熱効率の更なる向上、排気ガス、特にNO<sub>x</sub>問題の解決、高出力化、低コスト化を果たすことが要求されている。

大型ディーゼル機関用の過給機は、機関に必要な総合効率を達成し、その余剰出力を利用するターボコンパウンドシステムによって熱効率の向上、高出力化等の役割を果たしている。更に、ディーゼル機関のNO<sub>x</sub>対策や燃焼改善のために過給機のより一層の性能改善が期待されており、機関の要求に先行する形で遠心圧縮機、タービン、軸受等の要素効率や機関との適合性の改善が着実に進められている。

ここでは、主に研究開発面から見た船用大型ディーゼル機関と大型過給機の技術の進展について述べる。

## 2. 大型ディーゼル機関の技術の進展

## 2.1 出力向上

機関の競争力向上、船の高速化、大型化等に対応すべく機関出力が重要視され、機関のスペース当たりの出力増大のために平均有効圧力と機関回転数の増加が進展している。図1は、Sulzer社の平均ピストン速度、平均有効圧力、筒内最高圧力の変遷を示す。<sup>(1)</sup> 同図より明らか

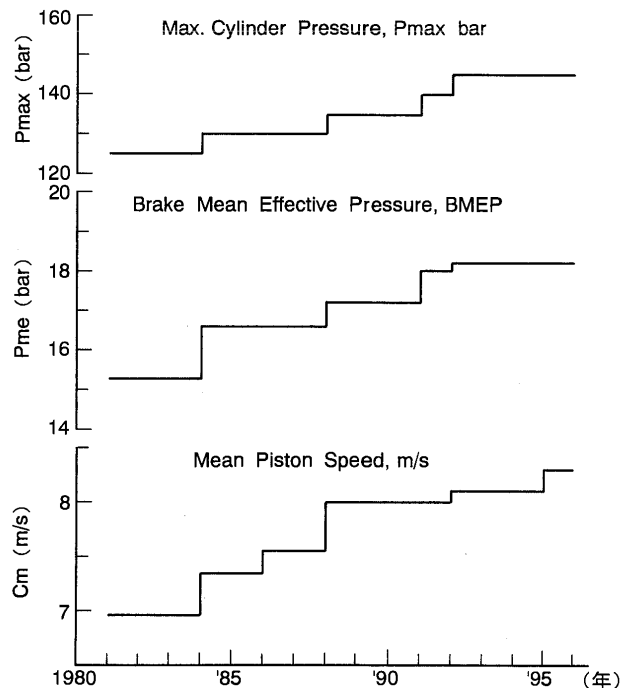


図1 シリンダ最高圧力、平均有効圧力、ピストン平均速度の進展<sup>(1)</sup>

なように、この十年で平均ピストン速度は14%、平均有効圧力は10%上昇しており、筒内最高圧力は150 barに迫る勢いで上昇している。このような出力向上を可能にするため、過給機への要求もますます厳しくなっている。即ち、比出力の増大のため過給機の圧力比向上が求められ、排ガス温度の過上昇抑制のため効率向上が必要となっている。過給機の総合効率が1%向上すると排ガス温度が約10 K低下して排気弁等の信頼性向上に有益であるが、排ガス温度が低下すると排ガスエコノマイザーの回収率が低下する。

一方、機関の高出力化は、過給機系のみならず、燃料噴射系の技術にも大きく依存しており、燃料噴射圧力の変遷を図2に示す。同図より、高圧噴射化がますます進展し、最高噴射圧力は150 MPaを超えて170~180 MPaレベルに到達するものと考えられる。

## 2.2 環境対応力

地球環境保護のため世界海事機構IMO (International Marine Organization), CARB (California Air Resources Board) 等において西暦2000年頃を目標とした排ガス規制<sup>(2)</sup> (図3) 施行に向けた動きが活発になって

原稿受付 1997年1月30日

\* 1 三菱重工業(株) 長崎研究所

〒851-03 長崎市深堀町5-517-1

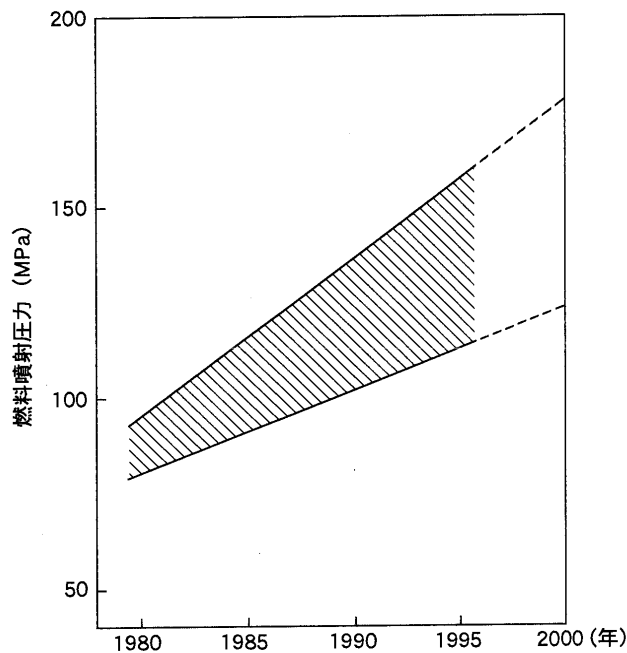
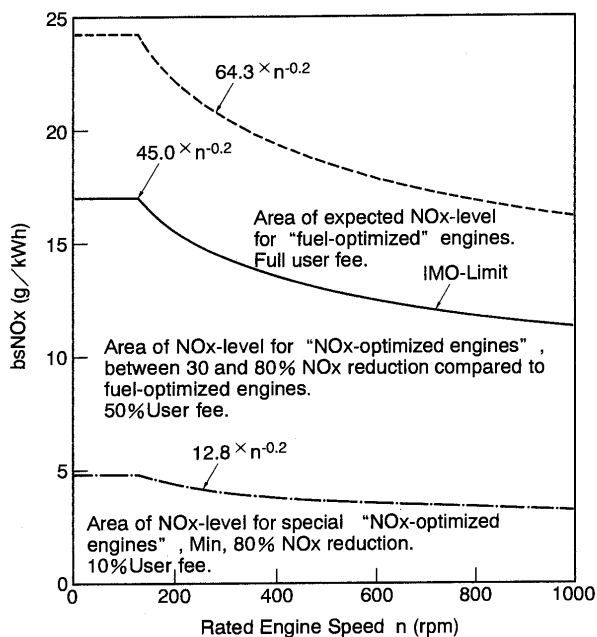


図2 燃料噴射圧力

Measuring standard : ISO 8178  
Full user fee penalty corresponds to 10000US\$/ton NOx

図3 ディーゼル機関に対する NOx 規制<sup>(2)</sup>

いる。

IMO では NOx, SOx を西暦 2000 年迄に現状レベルのそれぞれ 30%, 50% 削減を目指すものであり、それぞれの国や港では CARB 並みの厳しい規制の適用も検討されており、船用機関の大きな課題となっている。

NOx と SOx は、燃料中の成分によって影響され、SOx は燃料中の硫黄分に、NOx は窒素分に影響される。現在の C 重油を燃料とするディーゼル機関では、サーマル NOx が支配的であり、燃焼最高温度の制御による

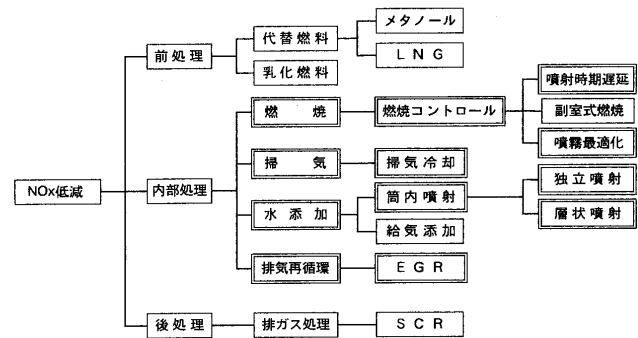
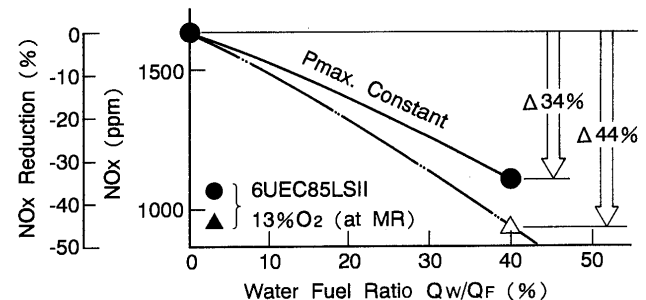


図4 NOx 低減技術

図5 燃料・水層状噴射による NOx 低減効果<sup>(3)</sup>

NOx 低減が有効である。

船用ディーゼル機関の燃焼は乱流拡散炎であり、NOx 生成は燃焼室内の局所的な高温度及びその保持時間に依存する。

図4は、NOx 低減技術を示す。

燃焼改善による NOx 低減は主として燃焼温度低下を狙ったものであり、このための具体的な手法の一つに水添加燃焼がある。ここで、燃料・水層状噴射による NOx 低減結果を図5に示す。<sup>(3)</sup> 同図より約 40% の水注入量で約 44% の NOx 低減効果が確認され、将来予想される NOx 規制にも十分な対応力があるが、この方法では燃料消費率の悪化を避けることができない。

また、EGR については大幅な NOx 低減の可能性を生かすべく、シリンダ、過給機、エアクーラー等の汚れ、腐食などの問題を解決し、機関の耐久性を確保するための改善策の開発が望まれる。

現状の NOx 低減技術では、排出量と熱効率は、基本的にトレードオフ関係にあり、NOx 問題は、世界の物流の担い手としての船舶輸送の経済性へも影響することも予想される。このため同様の低質重油を燃料とし、低 NOx 化を既に実現しているボイラと同様に燃料噴霧の希薄混合気域での低 NOx 燃焼と過濃混合気域での NOx の還元等の基本的な NOx の生成過程を考慮した新しい NOx 低減技術の開発も行われている。このような時代のニーズに対応し得るディーゼル機関が将来の船用機関として生き残ると考える。

## 2.3 燃料の低質化

船用ディーゼル機関では物流コストの低減と資源の有効利用を狙いとして低質燃料・C 重油を使用してきた。こ

の低質燃料を利用できる点がガスタービンに対する優位点の一つである。最近の燃料動向として重油の需要が減少傾向にあるため、その需要に見合うように残査油を分解しており、重油の品質はますます低下している。図6に重油のC重油基材構成の推移を示す。<sup>(4)</sup> このような低質重油に対応するためには、燃料の前処理のみならず燃焼特性の改善も重要である。このため着火性が低く、後燃え性も悪い低質重油を低公害でかつ高効率で燃焼させる技術の開発が進められている。燃料噴射系はディーゼル燃焼のキーテクノロジーであり、その高圧化、電子制御化が進展している。図7はSulzer社の蓄圧式電子制御高圧噴射装置を示す。<sup>(5)</sup> 低質重油の使用に対応して増圧ピストン方式を導入し、作動油によるプランジャ駆動としている。また、この増圧ピストンは高圧化に有利であり、高圧噴射による低質重油の燃焼改善を狙っている。

一方、燃料の低質化は機関の信頼性へも大きな影響を及ぼしている。燃焼不良に起因する摩耗やFCC触媒粒子の混入による異常摩耗が報告されており、その対策が求められている。<sup>(6)</sup> これに対応して船用重油の規格改訂をすべく検討が進められている。

#### 2.4 熱効率向上

ディーゼル機関の熱効率向上はCO<sub>2</sub>問題や資源の有効利用の点から基本的に重要な課題である。最近の石油価格の安定化傾向のため低燃費より高出力化の要求が強いが、長期的に見れば石油価格の上昇は避けられず、低燃費化の強い要求が顕著になるときが来ると予想される。これに対応する新しい高効率燃焼技術の開発、ターボコンパウンドサイクルや高膨張比サイクルの採用等により一層の性能改善が期待されるが、その実現にはコスト低減等の多大の努力が必要である。

#### 2.5 回転数

船用ディーゼル機関の回転数(図8)は、推進効率向上を狙ったプロペラの大型化によって約70rpm迄低速化

され、ボアストローク比が4程度のロングストローク機関が一般的になっている。しかし、現在開発中の超大型機関は、高速コンテナ船用であるために回転数100rpm程度、ボアストローク比が2.4~2.6と小さくなっており、平均有効圧力18.5kg/cm<sup>2</sup>、ピストン速度8.3m/sとともに従来の機関並みである。

#### 2.6 小型・軽量化

図9に各種船用機関の比重量比較を示す。大型ディーゼル機関の比重量は、25~30(kgf/PS)であり、船用機関の中で最も重く、他の機関並みの軽量化を行うには革新的な技術開発が必要である。特に、今後の物流量の増加と高速化に対応するためには、大型ディーゼル機関も小型・軽量化を図ることが重要と考える。

燃料経済性が重視される低速船用機関としてガスタービンを採用するには、重油焚きを可能とし、コンバインドサイクル化して熱効率の向上を図る必要がある。現用の船用蒸気タービンとを組み合わせたコンバインドサイ

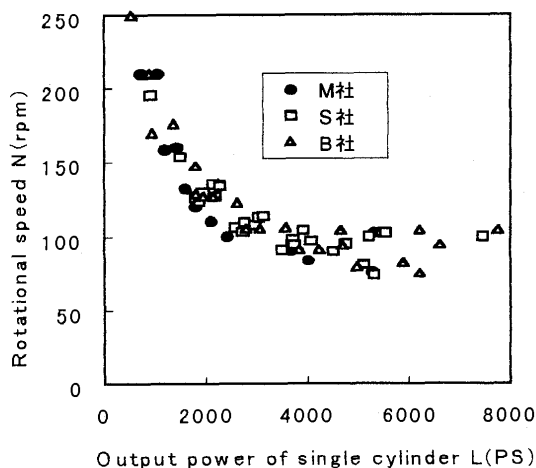


図8 大型ディーゼル機関の回転数

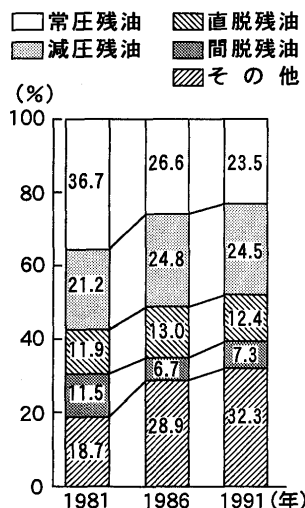
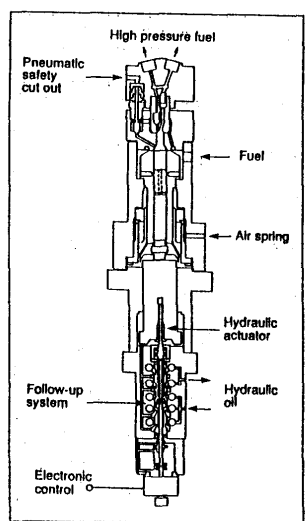


図6 C重油成分の変化<sup>(4)</sup>



The electronically-controlled fuel injection pump adopted in Sulzer's 4RTX54 test engine.

図7 電子制御燃料噴射弁<sup>(5)</sup>

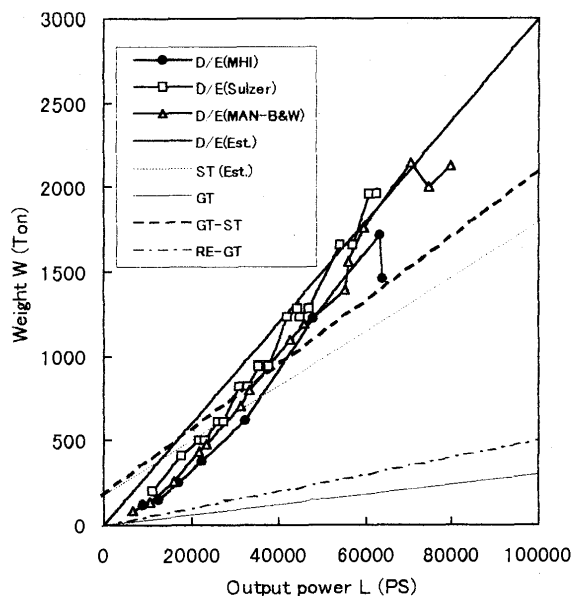


図9 船用機関の重量比較

クルガスタービンの比重量は4万馬力以下では、大型ディーゼル機関より重くなり、4万馬力以上では軽くなっている。再生サイクルガスタービンは、熱交換器を装備しているため、重くなっているが、それでも単純サイクルガスタービンの1.5～2倍であり、将来の船用機関として期待される。

## 2.7 機関の構造

従来から機関のコンパクト化、部品点数の削減、コスト低減、組み立て・分解、保守点検の容易化等のために数部品のユニット化等が行われてきたが、この考えを更に進めた「高機能集積型機関」又は「パイプレス機関」と呼ばれる画期的な新型中速機関、MaK M 25, MAN B & W L 16/24 (図10)<sup>(8)</sup>, Wartsila 26等が製作されており、部品点数の30～40%削減に成功している。

この機関は、外観デザイン、機能共に優れたものであり、「パイプレス」の設計思想は、今後の機関設計の主流を成すものと考えられる。

## 2.8 高信頼度船用推進プラントの研究開発<sup>(8)</sup>

昭和58～63年度に運輸省の指導のもとで(財)日本船舶振興会の助成を受けて高信頼度船用推進プラント研究組合において要素技術研究が実施された。この成果を継承して平成元年に設立された(株)ADDにおいて平成元年～5年度にわたり運輸省の次世代船舶研究開発促進制度のもとに造船整備事業協会の助成金を受けて開発された要素技術をベースとして実用機の開発が行われた。この実験機関の断面図を図11に、主要目を表1に示す。この機関は、高圧噴射(2000 kgf/cm<sup>2</sup>)、高平均有効圧力(27.5, 30.0 kgf/cm<sup>2</sup>)、高ピストン速度(12 m/s)を有する中速ディーゼル機関であり、多くの先進的技術が使われており、次世代の中速ディーゼル機関の姿を示すものとして注目に値する。

Modular assembly  
of the MAN B&W  
Holesby Diesel L16/  
24 genset engine

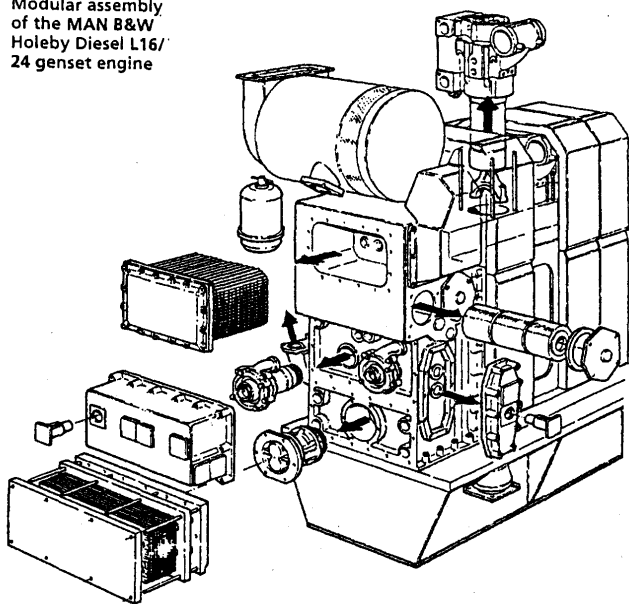


図10 MAN B & W Holesby Diesel L16/24  
発電用機関のモジュール式構造<sup>(7)</sup>

## 3. 大型過給機技術の進展

### 3.1 形式と構造

大型過給機は、軸流タービンと遠心圧縮機の組み合わせが一般的であったが、三菱重工業(株)で大型ラジアルタービンを用いた可変ノズル付き過給機MET-66 SR-VGが開発され、引き続きMET-SR(図12)<sup>(9)</sup>が発売された。また、MAN-B & W社もラジアルタービン(斜流)付き大型過給機NR/S<sup>(10)</sup>を開発しており、ラジアルタービンとの組み合わせも一般化しつつある。大型過給機NR/Sには、フルフロート軸受が採用されている。

ABB社の大型過給機VTRの特徴は、ボールベアリング両端支持構造であったが、新型のTPシリーズでは滑り軸受の内側支持構造に変更されている。<sup>(11)</sup> (図13)

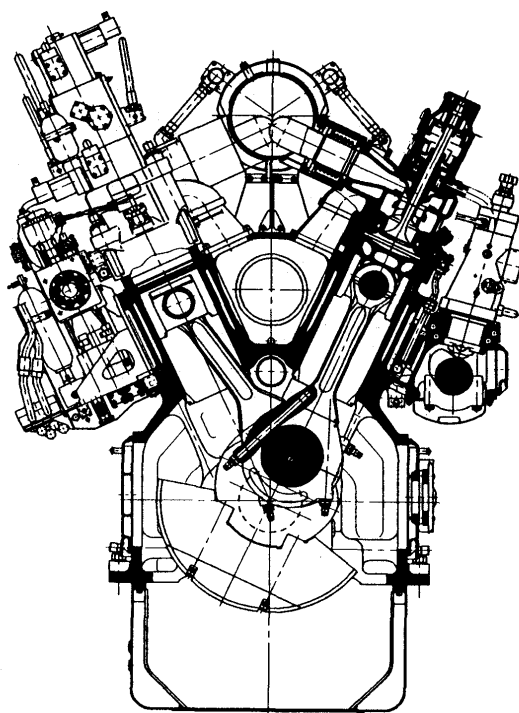
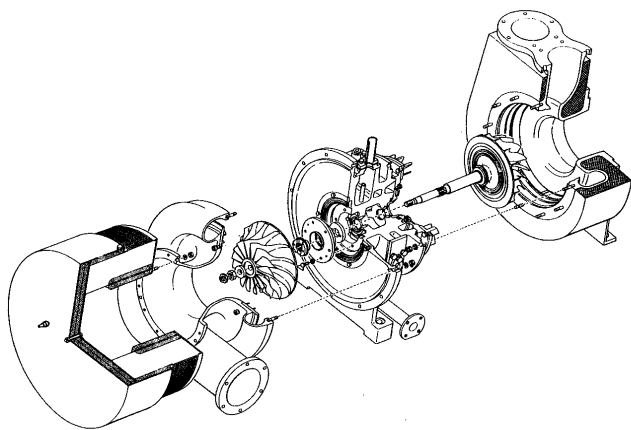
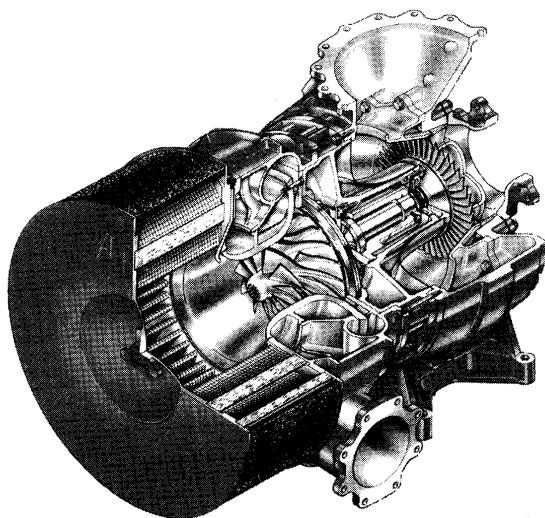


図11 高信頼度船用機関の研究開発試験機関の断面図<sup>(8)</sup>

表1 試験機関の主要仕様<sup>(8)</sup>

| 要目       | 単位                      | Ver. II       | Ver. II |
|----------|-------------------------|---------------|---------|
| シリンダ数    | -                       | 6L-9L 10V-18V |         |
| シリンダ径    | mm                      | 300           |         |
| ストローク    | mm                      | 480           |         |
| 回転数      | rpm                     | 750           |         |
| 過給方式     | -                       | 単段過給          | 二段過給    |
| TCS      | -                       | 無             | 有       |
| 機関出力     | BHP/Cyl.                | 780           | 850     |
| TCS 出力   | BHP/Cyl.                | -             | 90      |
| 正味平均有効圧  | kgf/cm <sup>2</sup>     | 27.5          | 30.0    |
| 平均ピストン速度 | m/s                     | 12.0          |         |
| 出力率      | kgf/cm <sup>2</sup> m/s | 330           | 360     |
| 機関重量     | kg/BHP                  | 約 5           |         |
| 燃費       | g/BHP h                 | 130 台         | 120 台   |
| 最高噴射圧    | kgf/cm <sup>2</sup> a   | 2000          |         |
| 爆発圧力     | kgf/cm <sup>2</sup> a   | 201           |         |

図 12 MET-SR 型過給機<sup>(9)</sup>図 13 TPL 65 型過給機<sup>(11)</sup>

### 3.2 機関出力と過給機入力

図 14 に大型ディーゼル機関 (UEC 85 LS II) の定格出力に対する排気エネルギー、タービン (過給機) 出力、圧縮機の空気馬力の比率を示す。排気エネルギーは、機関出力 100% で機関出力の 80% であり、燃費最良点まではその比率が減少するが、更に機関出力が小さくなると増大し、機関出力 30% 以下では機関出力を上回る。タービン出力は、機関出力 100~80% では排気エネルギーの 50% を回収しているが、それ以下では過給機の絞り効果が小さくなってタービン入口圧力が低下するためタービン出力が低下している。このようなタービン入口圧力の低下が生じないようにタービンのノズル面積を調整して排気エネルギーの回収率を高めるのが可変ノズル付き過給機の狙いである。

また、機関の所要空気馬力以上のタービン出力を利用するターボコンパウンドシステムには、

- ① 排ガスをバイパスして別置きタービンで余剰エネルギーを回収するシステム
- ② 過給機の回転軸から直接発電機等で回収するシステム

が考えられているが、過給機の回転数が発電機に直結で

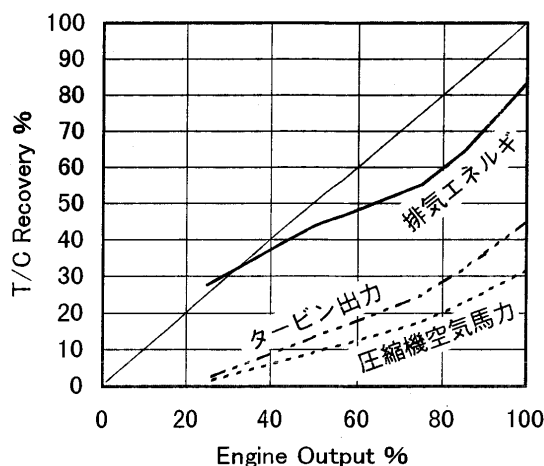


図 14 機関出力に対する排気ガスエネルギー、タービン出力、圧縮機空気馬力の比率

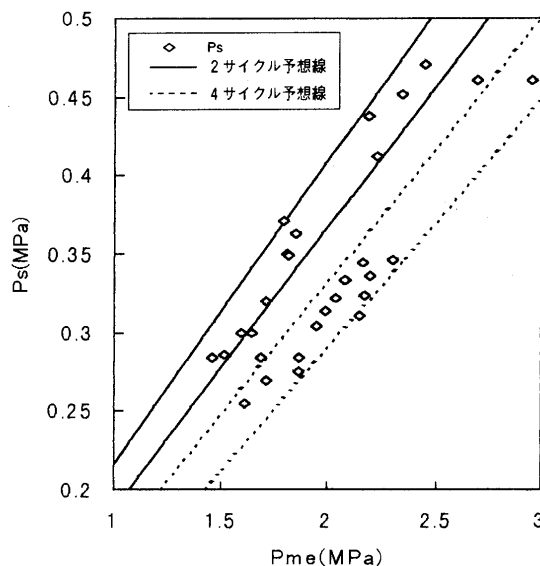


図 15 ディーゼル機関の平均有効圧力に対する給気圧力の変化

きる回転数より高いことや軸系の固有振動数が低下する等の問題があるために、前者のシステムが一般的である。

### 3.3 過給機の圧力比

過給機 (圧縮機) の圧力比は、図 15 に示す機関の平均有効圧力と給気圧との関係から求められる。機関の給気圧力は平均有効圧力の増大に伴って上昇しており、最近の中型機関では 2 サイクル、4 サイクルともに圧力比 4.5 を上回るようになっている。

圧力比が 4 を超す過給機 (圧縮機) では、中間冷却器の効果が顕著になり、相対的に約 10% の過給機総合効率の向上が見込まれており、機関全体の約 5% の出力及び効率の改善が可能となると考えられる。従来の二段過給機では、2 台の過給機を使用していたために配管が複雑で大きくなる欠点を有していたが、圧縮機のみを二段に構成した一軸二段型の過給機ではその欠点がなく、次世代の新型過給機としてその開発・実用化が期待される。



また、この他に給気冷却等の新システムが検討されており、機関と過給機の総合的なシステムが再検討される時期にきていると考える。

### 3.4 圧縮機

圧縮機の羽根車は、完全三次元粘性流動解析を使った空力設計、5軸 NC 加工が一般的になり、大流量型にはスプリット翼が、小流量の高圧力比型にはフルブレード型が採用されている。また、従来、同一の翼型の羽根車の入口巾と出口外形を削除して流量調整をするトリムが行われていたが、そのための効率低下を避けるために2～3種の羽根車を標準的に保有するようになってきた。

圧縮機の圧力比は、機関の平均有効圧力の上昇に伴って上昇しており、4.5を超すものが出ている。このような高圧力比遠心圧縮機の性能曲線を図16に示す。<sup>(12)</sup>

過給機の高圧力比遠心圧縮機は、羽根車と同軸のタービンの強度上の制約、低速域の効率下限の制約等によって高圧力比域の流量レンジの余裕が小さくなり、機関への最適マッチングスペックを細かにする必要がある、補用部品等を含めると大きなコストアップ要因となる。

圧縮機の圧力比の上昇に伴って高効率化とともに現用の高力アルミの強度余裕が小さくなること、羽根車前後の励振源による振動強度上の問題への十分な対応が必要と考える。

### 3.5 タービン

近年、小型過給機に採用されていたラジアルタービンが大型過給機にも採用されており、斜流タービンの採用も進むものと考えられる。

軸流タービンでは、排気ディフューザーの採用が一般化し、スクロールや排気ケーシング等の流力的な改善も進められている。また、軸流タービンの動翼は、振動強度

向上、翼枚数の削減、効率向上を狙いとして完全3次元ワイドコード翼(図17)<sup>(12)</sup>が採用され、翼振動対策のために設けられていたラッシングワイヤの廃止等によるコスト低減や効率向上も図られている。また、ワイドコード翼の採用によって翼枚数低減が可能であり、ワイドコード化はコスト低減に最も有効である。

過給機の総合効率の向上によって機関の排ガス温度が低下しているが、それ以上に圧力比が上昇し、遠心応力、振動応力ともに厳しくなっており、特に翼の植え込み部の応力低減が今後の課題となるものと考えられる。この対策として、最近開発が進められているチタンアルミ等の軽量・高強度の鍛造材や精密鑄造翼の採用による翼の軽量化が有望と考えられる。

ノズル翼も動翼と同様にワイドコード化による翼枚数の低減が進むと考えられるが、従来の後縁カットや置角変更等のコスト低減上の制約の範囲で、少翼枚数でもノズルウェーク空力励振力が小さい高効率翼型の開発が必要となる。

### 3.6 総合効率

図18と図19にABB社のTPL 80と三菱重工業㈱のMETの総合効率を示す。<sup>(11),(12)</sup> TPL 80は従来のものに比べて全域の効率を向上させ、低圧力比域の効率向上巾が大きく、圧力比4.5以上の効率低下は大きい。METは全域の効率変化を小さくし、高圧力比域での効率低下を抑えている。

低圧力比域での総合効率を高くすると低速域の効率改善ができるとともに補助ブローを小さくできるメリットがある。一般の発電用の機関では、常時100%近い出力で運転され、始動時間も比較的長く取れるため、定格出力相当圧力比の効率を重視した設計ができるが、船用機関では低速での効率も重視されるために低圧力比で高く高圧力比になるに従い低下するものが望まれるためより高度な空力設計技術が必要となる。圧力比に対する効率変化は、各社の機関搭載経験によって決められている。

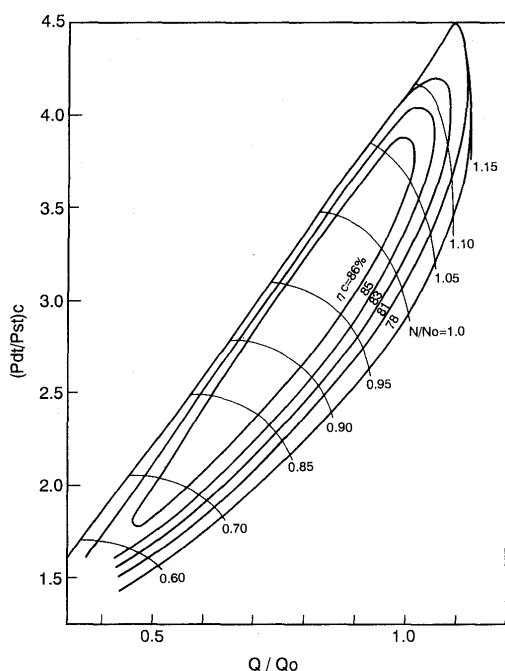


図16 過給機用高圧力比圧縮機の性能曲線の一例<sup>(12)</sup>

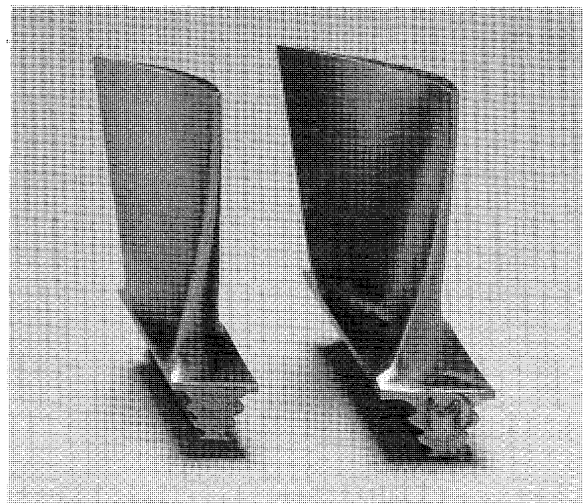
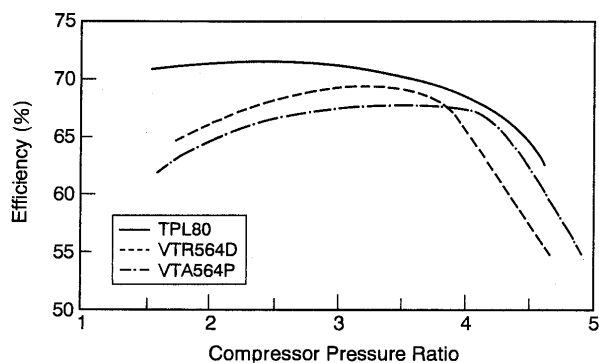
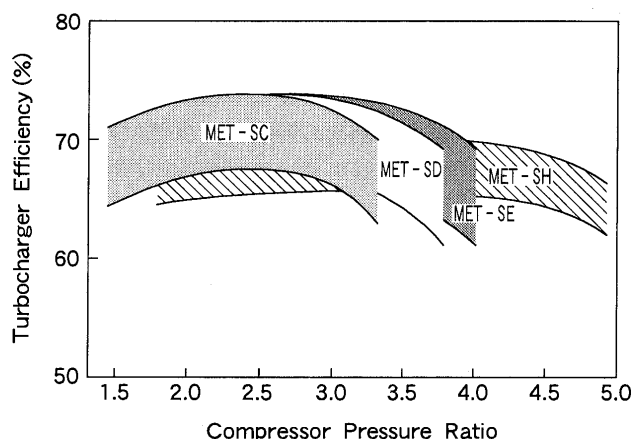


図17 3次元流動解析を使って設計されたワイドコードタービン動翼<sup>(12)</sup>

図 18 TPL 80 型過給機の総合効率<sup>(11)</sup>図 19 MET 型過給機の総合効率の進展<sup>(12)</sup>

### 3.7 次世代の過給機

次世代の過給機に要求される機能とそれを達成するための要素又は要素技術は次のものが想定される。

- ① 全作動域の排ガスエネルギー回収（可変ノズル）
- ② 無給油軸受（磁気軸受）
- ③ 軽量動翼（翼根部応力低減；チタンアルミ採用）
- ④ 低空力励振力ノズル翼（背面曲線翼型）
- ⑤ 高効率・ワイドレンジ過給機（中間冷却一軸二段型；単段タービン，二段遠心圧縮機，中間冷却器の組み合わせ）

### 4. あとがき

従来の技術動向の解説とは，多少視点を変えて書くことを試みたが，多くの資料の中で一部について述べるにとどまり，独善的な点が目立つ原稿となってしまった。

資料を提供していただいた各社の方々には，十分な活用ができなかったことをお詫びするとともに，紙面をお借りして心よりお礼を述べます。

読者の方々からの批判や助言をいただければ，この記事が少しでも新型過給機開発の刺激剤とでもなれば幸いである。

### 参考文献

- (1) K. Aeberli "Sulzer RTA96C engines" New Sulzer Diesel Ltd., October 1995
- (2) Merkus Geist, Rudolf Holtbecker, "LOW AND MEDIUM SPEED DIESEL ENGINES, COMPLIANCE WITH PROSPECTIVE EMISSION REGULATIONS", ICE-Vol.25-1, 1995 Fall Technical Conference Volume 1 ASME 1995
- (3) 古野他，"低速ディーゼル機関の最近の開発動向"，日本船用機関学会，第 57 回学術講演会，講演前刷集
- (4) 石油連盟環境部資料
- (5) MOTOR SHIP, February 1992
- (6) "低速 2 サイクル機関の展望"，日本船用機関学会誌，Vol. 31, No 8, 1996
- (7) "New medium speed designs promise strengthened reliability", MER June 1996
- (8) ㈱エイ・ディー・ディー "高出力ディーゼル機関の開発"，船の科学 Vol. 48 1995-4 pp. 42-47
- (9) "MITSUBISHI EXHAUST-GAS TURBOCHARGER RADIAL TURBINE DRIVEN MET-SR SERIES", MHI Nagasaki Shipyards & Machinery Works
- (10) "ニイガタ原動機ニュース" 第 48 号，新潟鉄工所
- (11) "New Generation of ABB Turbocharger," Diesel & Gas Turbine Worldwide, December 1996
- (12) "MITSUBISHI EXHAUST-GAS TURBOCHARGER MET SERIES", MHI Nagasaki Shipyards & Machinery Works

## 特集・ターボチャージャ

## 中小型過給ディーゼルエンジンとターボチャージャの進展

岩沢 勝三<sup>\*1</sup>,

IWASASA Katuzo

上村 正平<sup>\*1</sup>

KAMIMURA Shohei

## 1. まえがき

中小型ディーゼルエンジンは陸用及び船用エンジンの2つに大別され、各分野・各用途に幅広く採用されている。

陸用エンジンは、コージェネレーション(熱併給発電)システム・電力発電・建設産業機械・鉄道車両等に採用され、また、船用エンジンは、船舶の主機・補機に分類され、各種船舶の多岐に亘って採用されている。

この様に用途は幅広いため、エンジンの回転数は高速・中速・低速エンジンの3つに大別され、更に、4サイクル及び2サイクルの2つに大別され、多機種のエンジンが生産されている。

ここでは、主として高速から低速に亘る4サイクルディーゼルエンジンの動向について述べる。

## 2. 中小型ディーゼル機関の性能面の動向

陸用ディーゼルエンジンに対して、国及び地方自治体から非常に厳しいNO<sub>x</sub>規制が施行されている。また、常に宿命となっている高過給による高出力化及び軽量化が強力に推進されている。本分野での排ガス規制・高出力化の両面からその対応を迫られている。

一方、船用ディーゼルエンジンに対して、陸用エンジンと異なる動向として、各種船舶の高速化に対応して、一層の小型・軽量・高速化が進められている。また、高出力化・低燃費化・耐久性向上を図るため、エンジンの回転数を抑えてロングストローク化する動向もみられる。また、最近の動向として、IMO(国際海事機関)の2000年からの国際統一規制施行に向けて、燃焼改善による低NO<sub>x</sub>化が推進されていることも注目される。

図1は、中小型4サイクルディーゼルエンジンの $P_{me}$ (正味平均有効圧力)、 $P_{max}$ (燃焼最高圧力)及び $C_m$ (平均ピストン速度)の1965年から現在に至るまでの変遷と、2000年までの予想を示す。

1995年の $P_{me}$ ・ $P_{max}$ ・ $C_m$ は約2.5 MPa・約18 MPa・約10 m/sのレベルとなっているが、上述の各分野の技術要求動向に対応して、2000年のこれらの各数値は約3.0 MPa・約20 MPa・約12 m/sのレベルへと一層増加してゆくものと予想される。

エンジンの高出力化・低燃費化・排ガス規制対応は、ターボチャージャの高性能化と燃料噴射系の改善に依存していると言っても過言ではない。この高出力化の因子を図2に示す。

## 3. 各社ターボチャージャの技術動向

## 3.1 圧力比、効率の向上

機関の高出力化と低燃費化はターボチャージャの高性能化が大きな役割を果たして来た。図3は機関が要求するターボチャージャの圧力比の履歴を示したものである。

1970年代は機関の高出力化、1980年代は低燃費化、1990年代は高出力化と低NO<sub>x</sub>化に伴い圧力比=4.0となり、最近では更に上昇して圧力比=4.5~5.0となっている。

図4は、機関の要求するターボチャージャの総合効率の履歴を示したものである。1970年代は55%、1980年代

## DIESEL ENGINE DEVELOPMENT

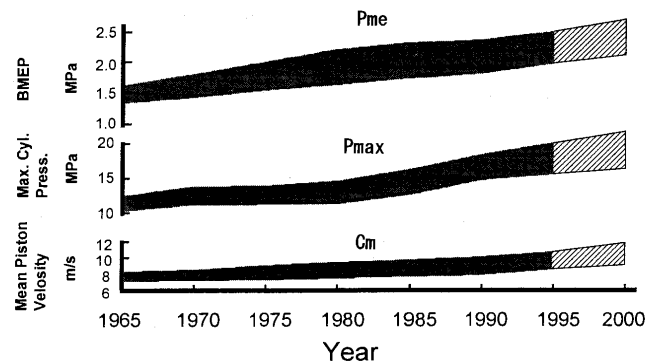


図1 中小型4サイクルディーゼル機関の正味平均有効圧力、シリンダー内最高圧力、平均ピストン速度

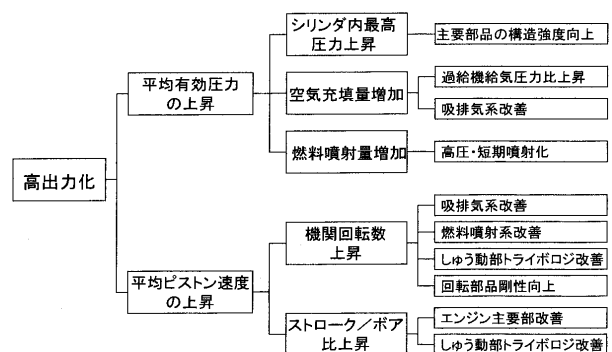
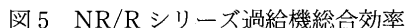
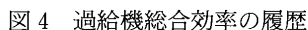
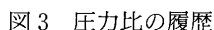


図2 エンジン高出力化の因子

原稿受付 1997年1月20日

\*1 (株)新潟鉄工所

〒957-01 新潟県北蒲原郡聖籠町東港 5-2756-3



タービン効率も近年著しく向上している。これは、CFD による 3 次元流体性能解析, FEM による応力解析が容易となりその検証及び加工技術, 計測技術が進歩して正確に行える様になった。この結果としてラジアルタービンは斜流タービンとなり高膨張比, 大流量化を図るとともに, タービン効率向上を図ってタービンホイールの小型化を図った。更に精密鑄造技術の進歩により素材重量として 90 kg まで鑄込める様になり, 中型ターボチャージャまでラジアルタービンを適用する様になった。図 8<sup>(2)</sup> に M・A・N B & W 社のタービンホイールの NR 20/S (新型ターボチャージャ) と NR 20/R の形状比較図を示す。図 9<sup>(2)</sup> は, NR 20/S (新型ターボチャージャ) と NR 20/R のタービン効率の比較を示す。タービン容

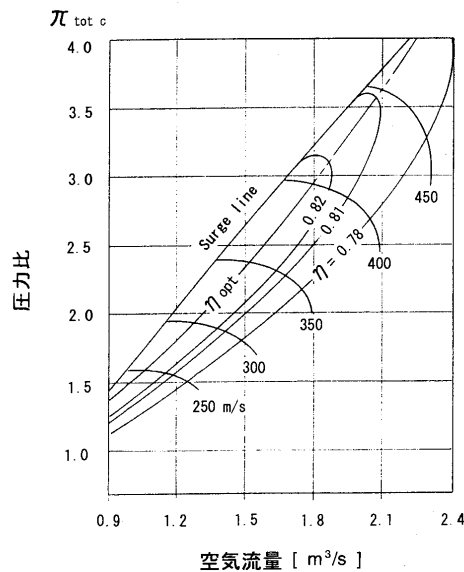


図6 NR 20/R コンプレッサー性能曲線

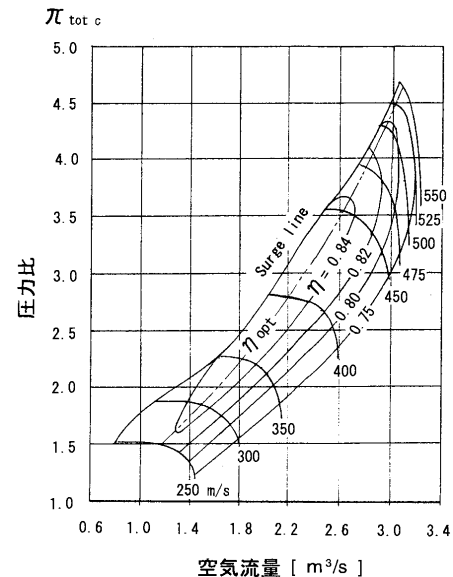
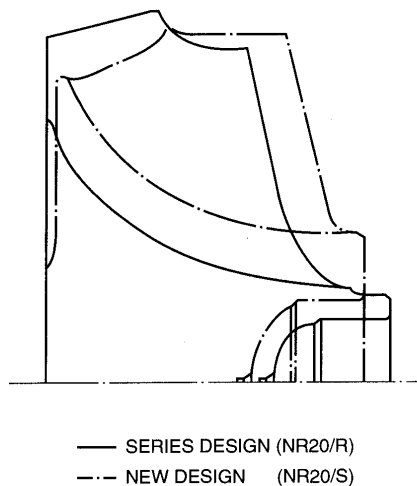
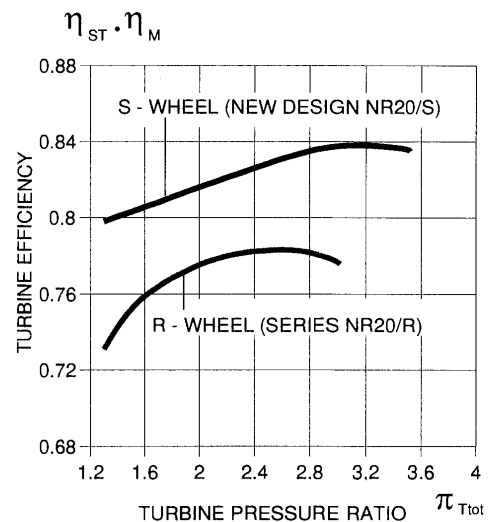


図7 NR 20/S コンプレッサー性能曲線

図8 NR/R, NR/Sシリーズ (NR 20)  
タービンホイール形状比較図9 NR/R, NR/Sシリーズ (NR 20)  
タービン効率比較

量の20%増大, タービン効率の5.5%向上 ( $\eta_A = 84\%$ )と改良されている。各メーカーにも採用されている。

タービン効率向上のため中型ターボチャージャに於いても同様の手法によりタービンブレードは彎曲翼(3次元)となり機械加工が難しいため精密鋳造翼になり、性能向上, コスト低減を図っている。M・A・N B & W社, NA/S形, ABB社, VTR...4P形へ適用されている。

タービン効率向上のため中型ターボチャージャに於いては, タービン動力出力部に排気ディフューザーを採用して排気エネルギーを回収している。図10<sup>(3)</sup>はABB社, VTR...4D断面図を示す。

### 3.2.3 構造比較

各メーカーのターボチャージャ構造を簡単に比較する。

図11<sup>(2)</sup>は, M・A・N B & W社, NR/S型ターボ

チャージャの断面図である。

軸受はメタル方式でロータ軸中心側を支持している。潤滑油は外部から強制給油を要する。タービンは斜流タービンを採用し性能向上及び小型化を図って, 同一形式で容量を20%増大させた。

図12<sup>(4)</sup>は, 石川島播磨重工業のRH3シリーズターボチャージャ断面図, 図13<sup>(5)</sup>は三菱重工業のMET-SRシリーズターボチャージャ断面図で, 構造的には似た方式を持っている。

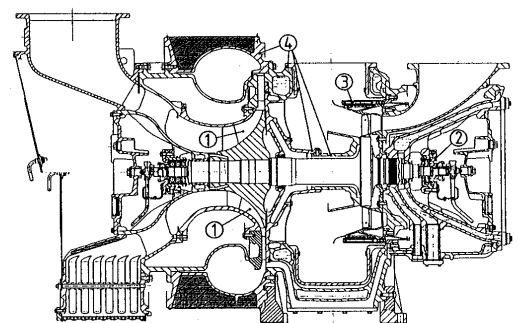
図10<sup>(3)</sup>は, ABB社, VTR...4D断面図で軸流タービンでロータ軸はボールベアリングにより支持され, 潤滑油はケーシング内部の油溜まりから自己給油される。タービンケースは水冷却を採用している。

各メーカーの分類表を次頁に記す。

| 型式     | タービン型式 | 軸受の種類  | 軸受支持位置  |
|--------|--------|--------|---------|
| NR/S   | 斜流タービン | スベリ軸受  | インボード形  |
| RH3    | ↑      | ↑      | ↑       |
| MET-SR | 輻流タービン | ↑      | ↑       |
| VTR-4D | 軸流タービン | コロガリ軸受 | アウトボード形 |

| 型式     | 給油方式   | ケース冷却方式   |
|--------|--------|-----------|
| NR/S   | 外部給油方式 | 無冷却式      |
| RH3    | ↑      | ↑ (軸受室冷却) |
| MET-SR | ↑      | ↑         |
| VTR-4D | 内部給油方式 | 水冷却式      |



① Compressor stage of VTR-4D with a one piece impeller having two different diameters  
 ② Improved turbine side roller bearing with modified oil feed  
 ③ Protective shroud for turbine containment  
 ④ Components made of ductile cast iron for higher operating reliability

図10 ABB社 VTR-4D 型過給機断面図

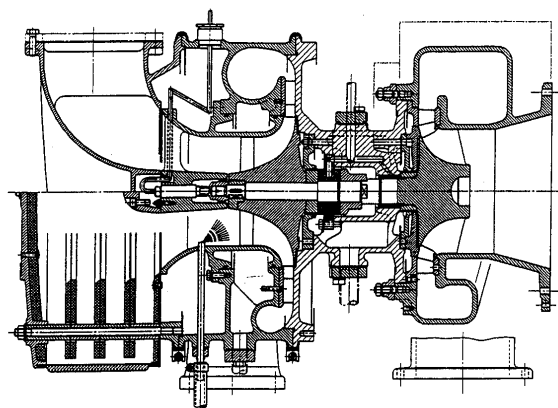


図11 MAN B & W NR/S 型過給機断面図

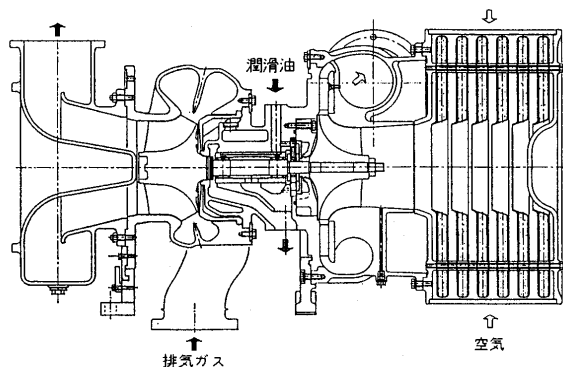


図12 石川島播磨重工業(株) RH3 型過給機断面図

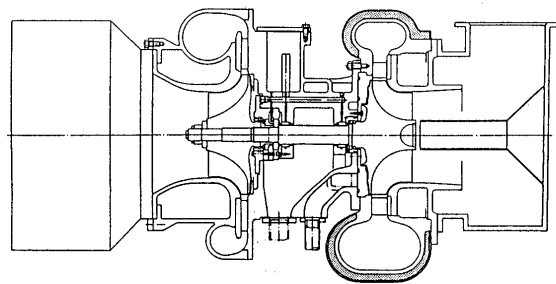


図13 三菱重工業(株) MET-SR 型過給機断面図

#### 4. ターボチャージャの課題

近年の機関高出力化に伴い、更なる高過給化及び低負荷時の追従性改善が必要となる。

##### 4.1 高過給化

機関の正味平均有効圧力の上昇に伴い、1段過給方式での限界圧力比が上昇していくものとする。

CFD, FEM の解析により高圧力比、大流量化を図りながら、インペラ小径化、ターボチャージャの小型化が図られ、信頼性、低コスト、低燃費、低公害に寄与するものとする。

##### 4.2 部分負荷対策

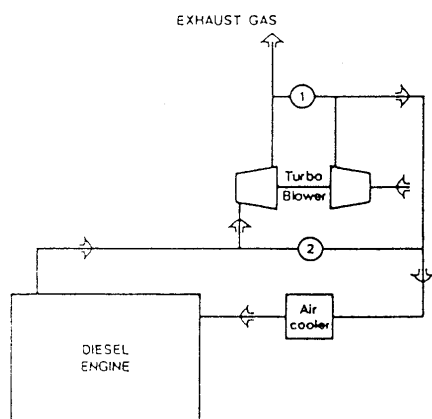
低、中負荷で運転した場合、給気圧力の低下による空気量不足と燃料噴射圧力低下による噴霧特性悪化により排気色、及び追従性が悪化してしまうことがある。

##### 機関側

- ・高負荷バイパス方式……部分負荷の給気圧力を上昇させて85%以上で空気または排気ガスを逃がしてシリンダ内最高圧力を改善値内とする。  
図14<sup>(6)</sup>
- ・ICS方式 ……………M・A・N B & W 社、船用主機の空気を利用して部分負荷の空気量を増加させる。  
図15<sup>(7)</sup>
- ・シーケンシャル過給方式 ……MTU 社、2台ターボチャージャを部分負荷では1台で使用する給気圧力、空気量を増大させる。  
図16<sup>(8)</sup>
- ・ジェットアシスト……………M・A・N B & W 社が採用しているもので加速度応答性をインペラへ補助空気を吹き付けて空気量を増大させ改善している。  
図17<sup>(1)</sup>

##### 過給機側

- ・VGS, VNT……………可変容量ターボチャージャ、自動車用では多く実績があるが、中小型ディーゼル機関では燃料の性状が悪くなるため、摺動部のスティック等問題がある。  
図18<sup>(9)</sup>



- ① By-pass high load  
② By-pass part load

図14 高負荷バイパス方式

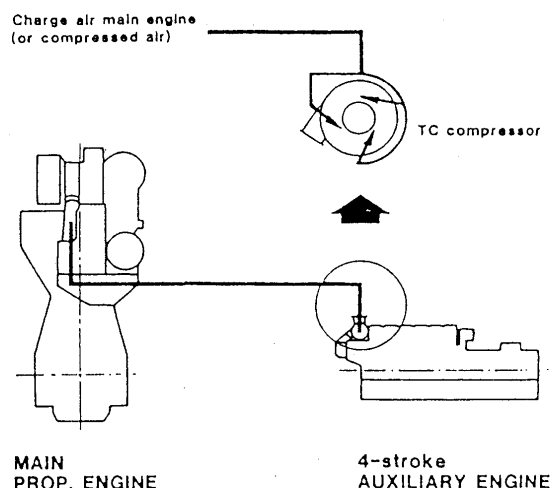


図15 ICS方式

- ・慣性モーメントを低減…軽量化を図るため  
タービンホイール材質を耐熱合金→TiAl→セラミックス化、比強度11.6→15.2→21.4に変更する。  
小型化  
斜流タービンにより20%容量増大によるホイール小径化。

## 5. あとがき

中、小型ターボチャージャについて概要を述べたが、技術的には高圧比化、小型化、軽量化、低コスト化、信頼性向上が進み、用途に最適なターボチャージャ、過給システム及び電子制御技術が開発され、今後21世紀の地球環境を改善していくためターボチャージャメーカーの一層の努力を切望する。

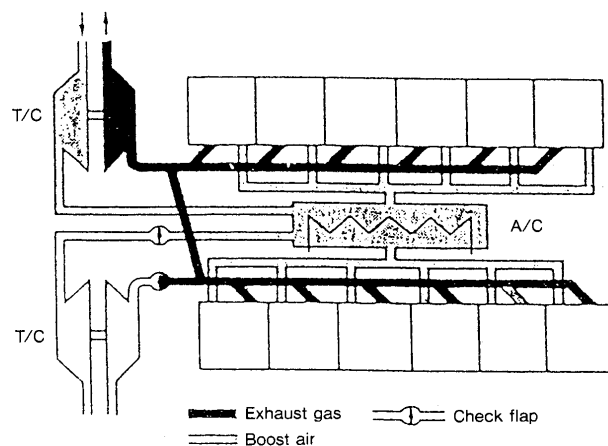


図16 シーケンシャル過給方式

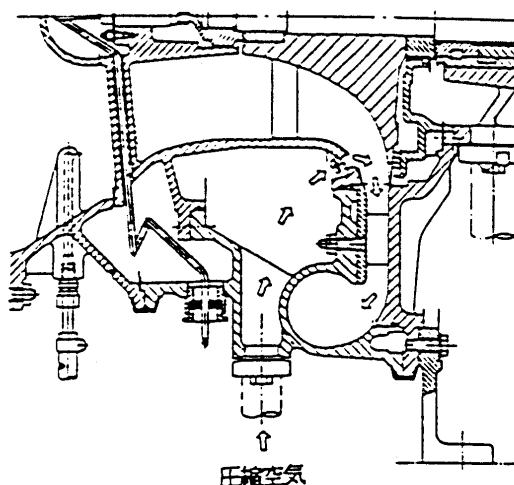


図17 ジェットアシスト方式

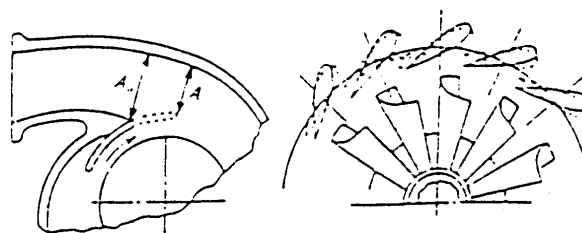


図18 可変容量型過給機（三菱重工業株）

## 参考文献

- (1) M・A・N B & W 社、過給機技術資料集
- (2) Dr. Wachtmeister, CIMAC 1995 D57
- (3) Hausruedi Born, CIMAC 1995 D96
- (4) 若井泰雄, 内燃機関 33 巻 2 号 1994-2 p. 40
- (5) 今給黎孝一郎, 日本船用機関学会第 40 回学術講演 1987
- (6) Y. Le Dizez and M. Bontour, ISME TOKYO '83, (1983-10) p. 519
- (7) O. Schnohr and O. Grone, ISME KOBE '90, (1990-10) p. C-2-25
- (8) R. Herrmann, ISME KOBE '90, (1990-10) p. D-8-9
- (9) 松尾栄人, 内燃機関 29 巻 1 号 1990-7 p. 83

## 特集・ターボチャージャ

## 乗用車用過給エンジンの動向

佐々木祥二\*1,

SASAKI Shoji

奥山 晃英\*2

OKUYAMA Akihide

## 1. はじめに

国内での過給エンジン乗用車の本格的展開は1979年のガソリンエンジンから始まった。乗用車メーカーではそれまでにレース用ガソリンエンジンにターボチャージャ（以下、ターボと略す）を適用し技術を養ってきており、また小型ターボ技術の向上もあり、ターボ車が市場に受け入れられた。当時のガソリンエンジンでは主に高出力化のためにターボが採用され、旧税制の排気量規制の下で適用が拡大していった。その後、税制が改正され排気量による税金格差が緩和されたのに伴い、ターボ付ガソリンエンジンは小型軽量で高出力という特徴を生かす使われ方が徹底し、スポーティ車や搭載スペースに制限のある車両に用いられる場合が多くなっている。一方、軽自動車では排気量規制の下で高性能車に過給エンジンが使われている。

過給ディーゼルエンジン乗用車の市販が始まったのは、ガソリンエンジンのターボ車が市場に出た翌年である。ディーゼルでは、ターボ装着は出力の向上や燃費及び排気の改善に有効であることからターボの採用が拡大し、現在ではターボ付きが無過給より多くなったメーカーもある。また、'94年以降実施に移されている短期および長期の排気規制達成のためにはターボが必須のデバイスであり、その装着率は益々高くなってきている。近年のRV車ブームの中でターボ付きディーゼルエンジン車の生産が拡大しており新エンジンの開発も目立つ。また、欧州ではCO<sub>2</sub>対策の関連で燃費低減のために過給直噴ディーゼルの開発が盛んである。このようにディーゼルが見直される中、エンジン性能の向上に向けた高過給化や新機構ターボの実用化といったターボへの期待が増している。

本解説では、乗用車におけるターボ付のガソリンエン

ジン、および、ディーゼルエンジンの動向について解説する。

## 2. 乗用車用過給エンジンの概要

図1に示すように、国内では排気量2ℓのガソリンエンジンの初ターボ乗用車以来、ターボエンジン機種が増加とともにエンジン本体およびターボ単体に様々な改良が重ねられてきた。乗用車では商品性の面からも、新エンジンやエンジン改良にあわせ新技術が取り入れられることが多い。新技術の開発に当たってはターボ及びエンジン両者の関連の深さから、乗用車メーカーが直接ターボ生産に乗り出している場合もある。例えば、トヨタ自動車では'84年以来ターボを自社生産しており、生産エンジン用ターボのほとんどをまかなっている。

図2は乗用車用ターボの一つであり、エンジンの高回転で排気ガスをタービンを通さずバイパスさせるウエストゲートバルブがついているのが特徴である。乗用車エンジンの使用回転域は広く低速からトルクが必要であるため、低速から過給圧が得られるようにタービンサイズを設定する。そのため、そのままではエンジン高速で過給圧が高くなりすぎるので、排気ガスをバイパスさせて

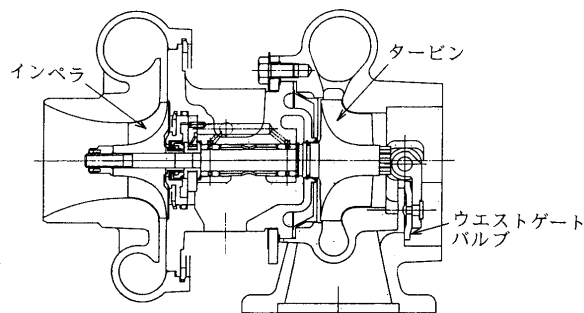


図2 乗用車用ターボチャージャの一例  
(ウエストゲートバルブ付き)

|       |          | '80~'84  | '85~'89              | '90~'94                           | '95~'96            |
|-------|----------|----------|----------------------|-----------------------------------|--------------------|
| ガソリン  | エンジンシステム | ・国内初ターボ車 | ・ツインターボ<br>・ツインスクロール | ・シーケンシャル<br>・スーパー+ターボ             | ・VVT+ターボ           |
|       | ターボ      |          | ・ジェットターボ<br>・セラミック   | ・ボールベアリング<br>・アブレーダブル<br>・ウィングターボ | ・樹脂インペラ            |
| ディーゼル |          | ・国内初ターボ車 |                      | ・VNT (欧州)                         | ・斜流ターボ・<br>アブレーダブル |

図1 乗用車用の新開発ターボエンジン

原稿受付 1996年12月25日

\*1 トヨタ自動車㈱ 〒411 静岡県裾野市御宿1200

\*2 トヨタ自動車㈱ 〒471-71 愛知県豊田市トヨタ町1



タービンの仕事を制限する。

乗用車に用いられるターボは軽自動車を含んでもそのインペラ径が約45～70 mmである。表1はトヨタ自動車のターボ機種とその搭載エンジンを示したもので、ターボの回転体諸元は基本的には3種類で、ガソリンで1.3ℓ～3ℓ、ディーゼルで2ℓ～4.2ℓに対応している。

図3は現状の過給ガソリンエンジンの出力を無過給エンジン(NA)と比較したものであり、過給により85 kW/ℓが得られている。NAエンジンの一部機種に過給付が設定されスポーツ仕様の車に搭載されている。乗用車では過度の大出力は実用上不要であり、排気量2.5ℓ以上ではターボを用いても低速のトルクを重視したエンジンにしている。つまり、低速からのフラットなエンジントルクが得られ、排気量が一ランク上のエンジンの加速感を実現している。また、ガソリンエンジンではノッキングがあることより、現在市販過給エンジンの多くはイン

タークーラーを装着している。過給圧はおおよそ50～60 kPaであり、中には80 kPa程度のエンジンもある。

図4は現状の過給ディーゼルエンジン(副室付, IDI)の出力を無過給エンジン(NA)と比較したものである。このエンジンの場合過給することにより出力が向上し、さらにインタークーラーを付けることでNAより約35%出力向上できることが判る。ディーゼルエンジンではNAと過給付の並売もあるが、過給付に置き換わっていくものが多い。それは、乗用車では小型高出力の要求が大きいこともあるが、排ガス規制(スモーク, パティキュレート, NOx, 等)への対応のためである。副室付エンジン(IDI)では過給圧が当初70 kPa程度であったが、最近では85 kPa以上である。直接噴射(DI)では100 kPa程度のものも出てきた。欧州では低燃費実現の切り札としてインタークーラー付ターボ直噴(TDI)エンジンが続々と開発されており、40～45 kW/ℓの高出力を実現しつつある。フランスのディーゼル車占有率50%を筆頭に、ディーゼル車の多い欧州の特徴が出ている。

表1 ターボサイズと搭載エンジン排気量; トヨタ自動車

| ターボ機種 | インペラ径(mm) | タービン径(mm) | ガソリンエンジン排気量(cc) | ディーゼルエンジン排気量(cc) |
|-------|-----------|-----------|-----------------|------------------|
| CT9B  | 50        | 46        | 1330            | 2000, 2200       |
| CT12B | 58        | 52        | 3000 (ツイン)      | 3000, 4100       |
| CT15B | 65        | 60        | 2500*           | ----             |
| CT20B | 68        | 60        | 2000            | ----             |
| CT20A | 62        | 60        | 3000 (ツイン)*     | ----             |
| CT9   | 48        | 46        | ----            | 2200             |
| CT20  | 57        | 60        | ----            | 2400             |
| CT26  | 65        | 68        | ----            | 4200             |

\* セラミックタービン

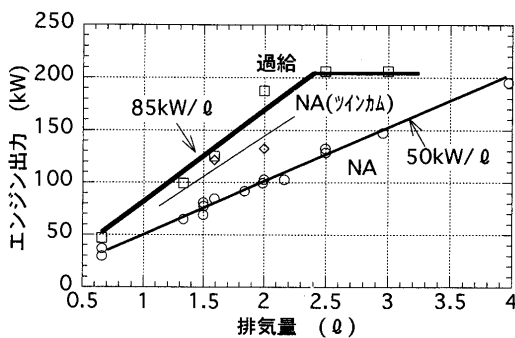


図3 乗用車用ガソリンエンジン出力

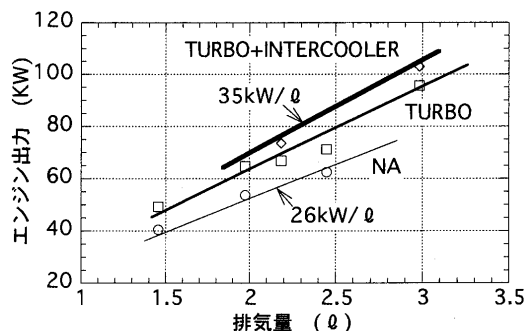


図4 乗用車用ディーゼルエンジン出力

### 3. エンジンシステム

#### 3.1 動圧過給

ターボ車は加速伸び感がターボフィーリングとしてユーザーに受け入れられたが、反面、アクセルを踏んでからターボの回転が上がるまでのわずかの時間がもたつき感を与えターボラグとして課題となった。また、もう一つの課題はエンジン低速トルクの改善である。つまり過給圧が所定値まで得られないエンジン低速で、ターボ装着の効果がきわめて少ない点である。低速トルクの改善でまずあげられるのが排気脈動を利用した動圧過給であり、少ない排気ガスでもうまく動圧を利用してターボの回転を高め過給圧を得る方法である。

動圧過給の方式の一つは図5に示すようなツインエントリーターボを用いたもので、排気干渉のないポート同士をまとめて一つの流路とし最終的に2つの流路でタービンホイールまで排気を導く<sup>(1)</sup>。本図は4気筒エンジンについて書いたものであるが、もちろん6気筒ではより効果的である。図6は排気量2ℓの4気筒ガソリンエンジンでシングルエントリーとツインエントリーのトルクを比較したもので、エンジン低速トルクの改善に有効な手段であることが判る。

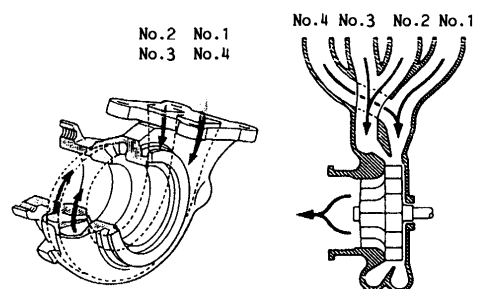


図5 4気筒エンジンとツインエントリーターボ

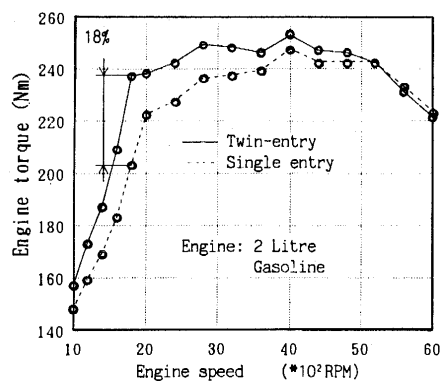


図6 ツインエントリーターボ付きエンジン性能

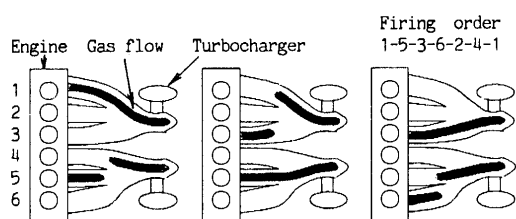
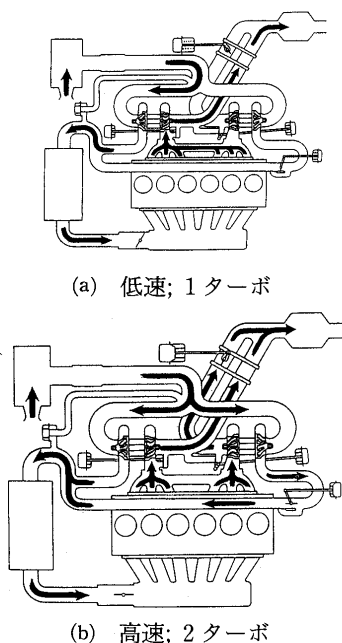


図7 ツインターボ付き6気筒エンジンの排気流れ

図8 TWO WAY TWIN TURBO エンジンシステム  
(6気筒, 3ℓ, ガソリン)

6気筒エンジンでは3気筒ごとにまとめて2つの流路にすることで4気筒より有効に排気干渉のない動圧を得ることができる。図7に示すように、ターボを二個付けたツインターボエンジンでは排気干渉のないスムーズな流れが得られている。ツインターボにするメリットはもう一つあり、大きいターボ一つより小さなターボ二つにした方が回転体の慣性モーメントが小さくなり、ターボの過給立ち上がりが早くなることである。

### 3.2 シーケンシャルターボエンジン

このシステムは2個のターボを用い、エンジンの低速

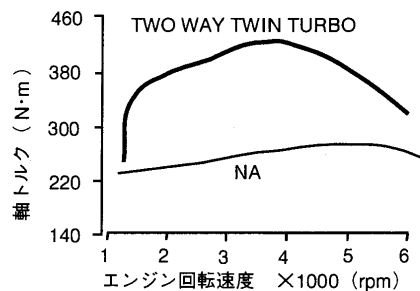


図9 TWO WAY TWIN TURBO エンジン性能

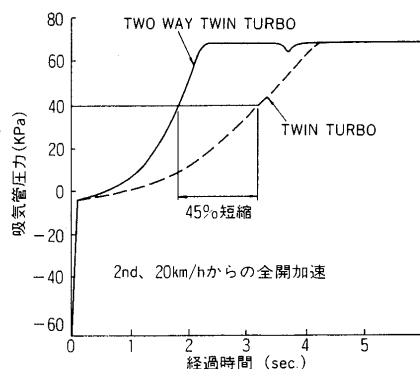


図10 TWO WAY TWIN TURBO エンジンの過渡特性

表2 ターボエンジンシステム比較

|                  | Twin Turbo | 2 WAY Twin Turbo | With VVT-i     |                     |                       |
|------------------|------------|------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
|                  |            |                  | Base (CT12A)×2 | Small Size (CT7B)×2 | Medium Size (CT15B)×1 |
| Max Power        | ○          | ◎                | ◎              | ○                   | ○                     |
| Max Torque       | ○          | ○                | ◎              | △                   | ◎                     |
| Low speed Torque | △          | ◎                | ○              | ○                   | ◎                     |
| Turbo Response   | △          | ◎                | ○              | ◎                   | ◎                     |
| Fuel Economy     | △          | △                | ○              | ○                   | ○                     |
| Emission         | △          | △                | ○              | ○                   | ○                     |
| Cost             | ○          | △                | △              | △                   | ◎                     |

◎...Very good ○...Good △...Acceptable

では一つを使い、高速では二つを使う方式で、乗用車メーカーによって呼び名が異なる。吸気側及び排気側にそれぞれ切り替えバルブを装着しており、二つのターボは同機種の場合が多い。図8に示すのはTWO WAY TWIN TURBOと呼ばれる6気筒3.0ℓガソリンエンジンで、図8-aがエンジン低速時の吸排気の流れで、図8-bがエンジン高速時の吸排気の流れである<sup>(2)</sup>。同型式の無過給エンジンと、全負荷トルクを比較したものが図9で、ターボの過給圧の立ち上がりを比較したものが図10である。トルク、過渡特性ともに大幅な改善が得られていることがわかる。

ターボ二個ではなく、機械式スーパーチャージャとターボを用いエンジン低速と高速で役割分担させ切り替えて使うエンジンもあったが、あまり普及しなかった。

### 3.3 可変バルブタイミング機構付ターボエンジン

近年 NA ガソリンエンジンへの可変バルブタイミング機構 (VVT) の適用が拡大しており、そのエンジンにターボを付けたシステムが市場に投入されている。ここでは直列 6 気筒 2.5 l のツインターボガソリンエンジンが VVT 化された例を示す<sup>(3)</sup>。表 2 はいくつかのシステムの長所短所を比較したものであり、最終的に連続可変バルブタイミング機構 (VVT-i) と高効率化されたシングルターボとの組み合わせが選択されている。図 11 は全負荷トルク特性を示しており、ターボの効率向上による効果と、VVT-i 化による効果が明確で、エンジン低速トルクの改良が著しい。エンジン改良の効果を過給圧の立ち上がりでみると所要時間は半減する。

## 4. ターボ改良とエンジン性能

### 4.1 ターボラグの解消

ターボ単体ではインペラとタービンの流体力学面の改良もなされてきたが、ここでは、図 1 に示した様なターボの構造面の改良について動向を述べる。

メタルのタービンをセラミックにすることにより慣性モーメントを小さくし、ターボラグを改善したものが約 10 年前に登場した。現在は国内で 2 社が採用している。セラミック化により慣性モーメントは 65% 低減でき、図 12 に示すように過給圧の立ち上がり時間が 34% 短縮され、車両で加速の違いを体感できる<sup>(4)</sup>。また、インペラをアルミから樹脂への材料変更で軽量化し、更なる過渡

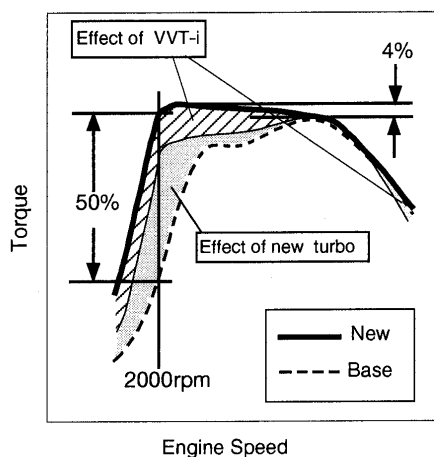


図 11 ターボ付 VVT-i エンジンの性能

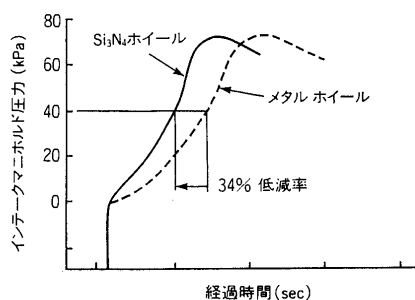


図 12 セラミックターボ付きエンジンの過渡特性

特性改善を図ったエンジンも 3 年前にでている。

タービンの慣性モーメントを小さくするには、単純にそのサイズを小さくするという方法もある。インペラ径に対して 100~90% のタービン径を用いるターボが多い中で、77% のターボもある。単純にタービンサイズを小さくするのではなく、斜流型ホイールにし入口部だけを小さくしたターボも実用化され始めた。これらのターボはインペラとタービンのマッチングがずれターボ単体効率で不利になるが、エンジンシステムとしてバランスが考えられている。

ターボラグの解消には軸受の機械損失低減も効果が大きい。フローティングブッシュを用いたジャーナル軸受のターボがいまだ多数であるが、そのフリクション損失を小さくするためボールベアリングを採用したターボが乗用車でも実用化され、着実に増加している。ジャーナル軸受より油量を大幅に低減し、ボールベアリング化のメリットを最大限に引き出しているものもある。この効果も過給圧の立ち上がり時間でみる事が多く、6% またはそれ以上短縮されると報告されている<sup>(5)</sup>。

最新のガソリンエンジンはエンジンシステムおよびターボ単体の両面でベストをねらっており、前述の各種改善項目の多くを取り入れたものになっている。この傾向は、高い商品性を追求する乗用車市場の特徴となっている。

### 4.2 可変ノズルターボ

ターボ単体の一つの理想は、タービン容量を可変にしたターボである。乗用車用可変ターボでは '85 年にタービンスクロールに一枚の開閉バネを付けたジェットターボが初めて実用化された。つづく '88 年には四枚のバネを用いたウィングターボが実用化された。これらはガソリンエンジンに採用されたもので、排気ガス温度が 900 度弱という高温下で可変機構の信頼性を確保するため、単純機構がとられた。ただ、単純機構であるがゆえ効率と作動域が十分には確保できなかったこともあり、それらのエンジンは国内では現在生産されていない。

ラジアルタービンの円周ノズルを可変にしたターボが欧州では乗用車でも実用化され、効率も従来ターボ並を実現している。図 13 は 2.5 l のディーゼルエンジンに搭

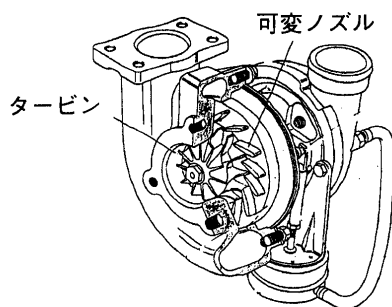


図 13 可変ノズルターボチャージャ (VNT 25, AlliedSignal Inc.)

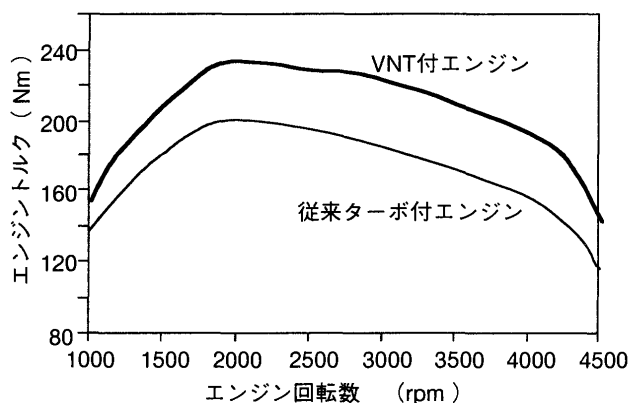


図14 VNT付きディーゼルエンジン性能  
(1.9ℓ TDI, VW)

載された可変ノズルターボ (VNT) である。直噴ディーゼルエンジンであるため排気温度はガソリンよりはるかに低く、図のような複雑な機構でも信頼性を確保できているのであろう。図14は1.9ℓのVNT付ディーゼルエンジンのトルク特性を示したものであり、従来ターボに対し全域で大きなトルク改善がみられる<sup>(6)</sup>。

## 5. 今 後

乗用車用過給ガソリンエンジンは高性能化の要求が強いのので、これまで通り新技術ターボ開発の牽引力になると考えられる。ただ、その用途がスポーティ車やエンジン搭載スペースの限られた車へと絞られつつある。

一方、ディーゼルエンジンでは排気対策の強化と出力向上要求に伴いターボが必須デバイスとなっており、インタークーラーも含め100%の装着率を予想する向きも多い。良好な燃費を特色とした1.5ℓ以上の直噴エンジンの開発が盛んな中で、ガソリンエンジン用ターボや大型車両用ターボで用いられた新技術が乗用車用ディーゼルエンジンでも適用されていくと考えられる。

エンジン側からのターボへの要求はますます厳しくなっている。特に、ディーゼルでの高過給化と広作動域化の要求は、ターボの高い信頼性を確保する上で大きな課題となっている。

## 参考文献

- (1) H. Ohki, 他: 「An Experimental Study on a Turbocharged Engine for a Passenger Car」 91-YOKOHAMA-IGTC-117, Nov. 1991
- (2) 大庭保美, 他: 「トヨタ2JZ型エンジンシリーズの開発」 TOYOTA Technical Review, vol. 41, No. 2, Dec. 1991
- (3) 鳥居正則, 他: 「連続可変バルブタイミング機構付ターボエンジンの開発」 自動車技術会 秋期大会, 1996
- (4) 高間健一郎, 他: 「セラミックタービンホイールの設計と評価」 TOYOTA Technical Review, vol. 41, No. 2, Dec. 1991
- (5) 會田昌弘, 他: 「ボールベアリングターボの開発」 日産技報, 第25号 (1989-7)
- (6) VW社「Development work on the 1.9L 81kW engine」 SIA diesel technology conference in Lyon, Apr. 1994

## 特集・ターボチャージャ

## トラック・バス用過給エンジンの動向

高橋 孝\*<sup>1</sup>,

TAKAHASHI Takashi

岡田 誠二\*<sup>1</sup>

OKADA Seiji

## 1. まえがき

トラック・バス用のターボ過給式ディーゼルエンジンは高出力、低燃費、軽量が要求される大型トラックを中心に広く採用されている。

馬力あたり重量の大きいトラック・バスにおいては、従来、低速トルクが大きく運転操作性の良好な大排気量の無過給エンジンが好まれてきた。

しかしながら、燃料価格の高騰に伴う運行経費節減の要求、積載量増大のための車両軽量化要求などにより、小排気量のターボ過給エンジンが近年増加の一途を辿っている。図1に国内大型トラック用エンジンのターボ過給化の推移を示す。

ターボ過給エンジンは燃費が良く、高出力で軽量、さらに排出ガスにも有利と良いことづくめである反面、自動車用として考えた場合には解決すべき問題も抱えている。

本解説では商用車用ターボ過給ディーゼルエンジンの変遷と特性、さらに将来に向けての技術展望についてまとめた。

## 2. 商用車用ターボ過給ディーゼルエンジンの変遷

## 2.1 出力性能

過給ディーゼルエンジンは過給率を高めるほど供給可能な燃料量が増大して高出力化が可能となるが、シリン

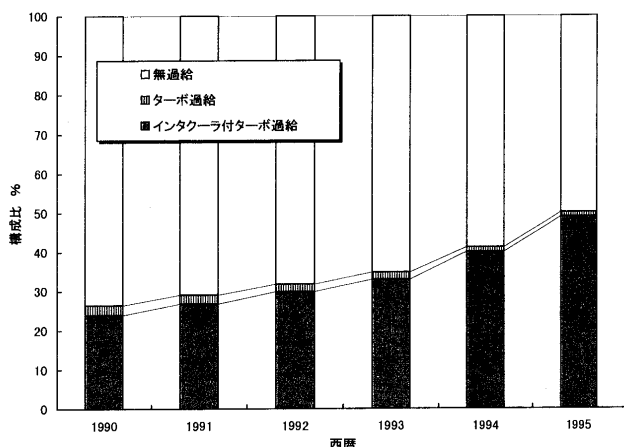


図1 ターボ過給エンジンの構成比推移  
(国内大型トラック)

ダ内の燃焼圧力 ( $P_{\max}$ ) の増大に対応した強度増大が必要となる。

過給ガソリンエンジンはノッキング限界で出力が制約されるのに対し、過給ディーゼルエンジンはこの  $P_{\max}$  により出力が決まるといっても過言ではない。

過給エンジンが登場した当時、自動車用ディーゼルエンジンの  $P_{\max}$  は出力と強度増大による重量増のバランスから 12 MPa が限界といわれていたが、材料の改良や設計技術の進歩により、現在は 15~18 MPa のエンジンも出現している。

図2にターボ過給エンジンの比出力の推移を示す。

'80年以降年々高過給化が進み、比出力は'80年当時の 19 kW/l に対し近年では 26 kW/l と約 40% の向上が図られていることがわかる。

## 2.2 燃費性能

ディーゼルエンジンの燃費改善は燃焼の改善や4弁化、過給方式の改良が重要である。

燃焼の改善は予燃焼室式から直接噴射式への燃焼方式の変更、そして燃料噴射ポンプの高圧化、噴射タイミングや噴射圧力の電子制御化へと燃料噴射系の改良が続けられている。

また、4弁化はポンピングロスの低減に加え、燃料噴射ノズルの燃焼室に対するシンメトリー配置による燃焼改善も望めることから、採用するエンジンが増えている。過給方式の改良としてはターボ過給化に始まり、ターボチャージャの効率向上、そしてインタークーラ（給気冷却器）付ターボ過給全盛の現在に至っている。

図3に燃料消費率の変遷を示すが、段階的に燃費改善

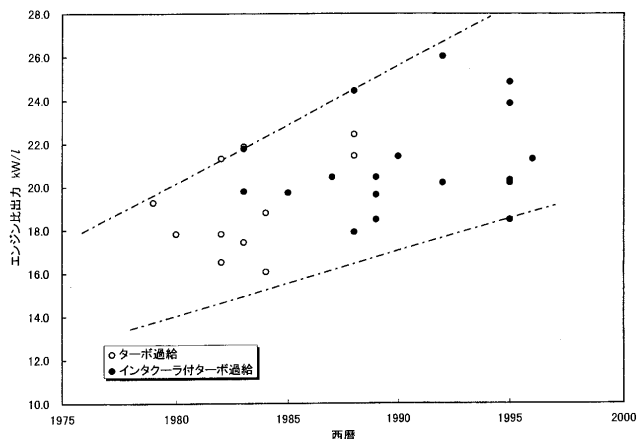


図2 ターボ過給エンジンの比出力の推移

原稿受付 1996年12月17日

\* 1 三菱自動車工業(株) 〒211 川崎市中原区大倉町10番地

が図られ、現在、熱効率率は40%以上に達している。

### 3. ターボ過給エンジンの特性

#### 3.1 低速性能と過渡特性の改善

容積形機械のレシプロエンジンと速度形機械であるタービン・コンプレッサの組み合わせはアンマッチングが避けがたく以下のような問題を抱えている。

##### (1) 低速性能

ターボ過給エンジンは極低速回転域では排気流量の低下により排気タービンはほとんど働かず、事実上無過給エンジンなみのトルクとなる。トラック・バス用エンジンでは出力あたりの車両重量が大きいため、過給により向上した出力に見合った極低速回転域トルクがないと発進性能に問題を起こす場合がある。

また、低負荷時は排気温度が低いため、排気タービンは有効に働かず排気圧力が給気圧力を上回って、かえって効率が低下するなどの問題もある。

##### (2) 過渡特性

自動車用過給エンジンで特に重要なのは過渡特性である。急加速時にはターボチャージャの作動遅れにより、エンジン出力は定常運転時より大幅に低くなる。

この発生トルクの立ち上がり遅れがターボラグと呼ばれる、自動車用ターボ過給エンジンの応答性が問題にされる原因である。

図4にターボ過給エンジンと無過給エンジンの発進加速時の過渡トルク特性を示す。

以上の問題点を解決する過給システムとして、実用化されているものを以下に示す。

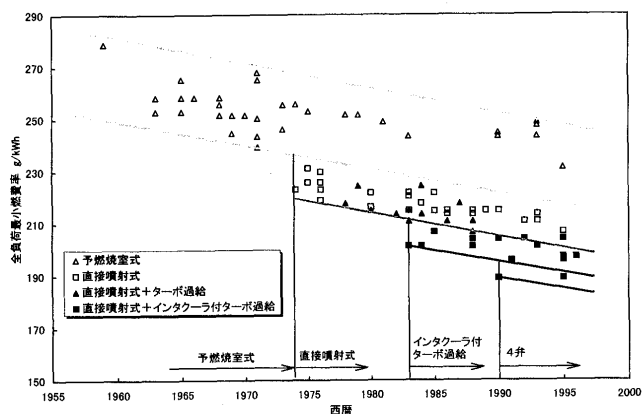


図3 燃料消費率の変遷

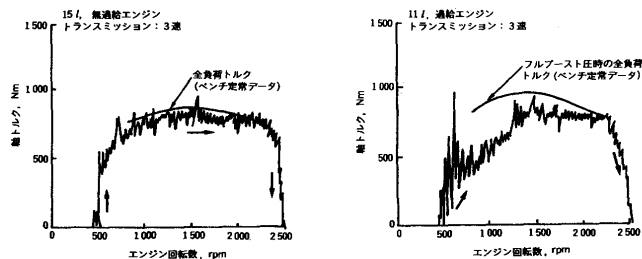


図4 発進加速時の過渡トルク特性

① 可変 (Variable Geometry: VG) ターボチャージャ  
ターボチャージャの排気タービン入口面積を可変にして、給気流量制御を行う方式で、各種の構造があるが一例を図5に、また、効果を図6に示す。

##### ② 吸気慣性過給

吸気配管の長さを吸気脈動の波長に合わせることで、給気比を向上する方式で、低速域に同調させて性能を改善する。

##### ③ 機械式過給機併用方式

ターボチャージャと機械式過給機を併用して、低速は機械式過給機、中高速はターボチャージャで過給する方式で、欧州のエンジンにおいて実用化された例を図7に示す。

#### 3.2 過給化による排出ガス低減

ディーゼルエンジンの排出ガス低減はNO<sub>x</sub>, PM (粒子状排出物) の低減が最も重要であり、現在精力的に対策が行われている。

NO<sub>x</sub> の低減には燃焼温度の低減が不可欠だが、不完全燃焼となりやすく、PM, 燃費の悪化を招くことになる。

PM の低減には、燃焼の高温化や燃焼後期の空気導入改善による再燃焼の促進が有効である。このように、

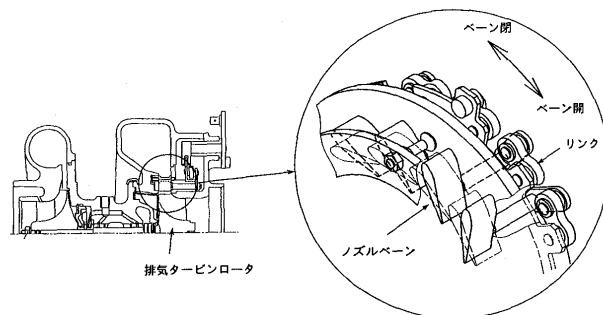


図5 VG ターボチャージャの構造

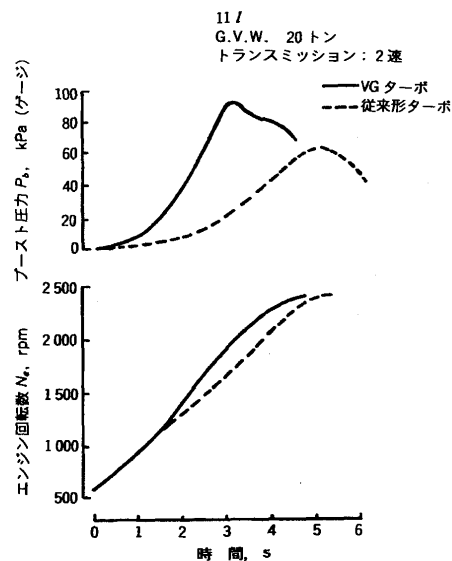


図6 VG ターボチャージャの効果 (発進性能比較)

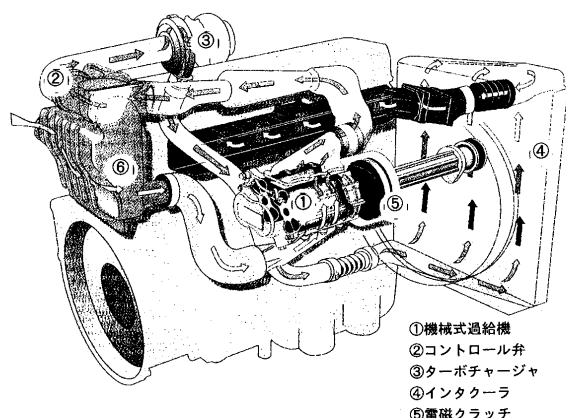
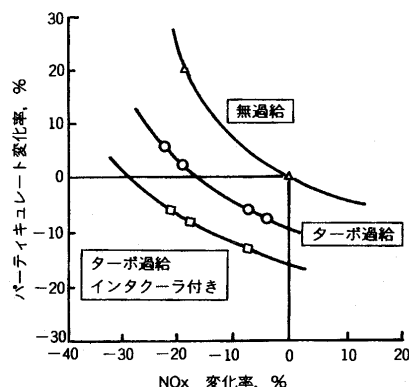


図7 機械式過給機併用方式(ボルボ D6 A 250 の例)

図8 NO<sub>x</sub> と PM の改善例

NO<sub>x</sub> と PM の改善は互いに相反するトレードオフ関係がある。

ターボ過給エンジンでは、空気量増大により PM の低減が期待できるが、ターボチャージャ通過後の給気温度は 100°C を超える高温であり、このまま燃焼に用いると燃焼温度が上昇し NO<sub>x</sub> が増大する。そこで、この給気温度を冷却することにより、シリンダ内雰囲気温度を低減させることが可能で、NO<sub>x</sub> 低減に有効な手段である。図8に NO<sub>x</sub> と PM のトレードオフ改善例を示す。

また、給気温度の低減はシリンダ内の空気密度が大きくなり、燃焼に関与する空気量が増加し、燃焼改善、黒煙低減、燃料消費率低減の効果がある。同時に給気温度の低減は燃焼温度、排気温度の低下にもなり、エンジン耐久性の改善にもなる。

図9に給気冷却の効果を示すが給気温度の低減に伴い、NO<sub>x</sub> の低減と燃費改善が得られていることがわかる。

今後、さらに厳しくなる排出ガス規制に対応するためには給気冷却器付ターボ過給が必須アイテムとなる日も近いと考えられる。

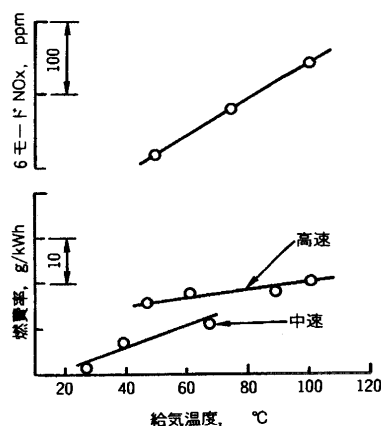


図9 給気冷却の効果

ジン本体構造の変更なしに従来型ポンプから変更することができるため、多くの高出力エンジンに採用されている。(図10)

このポンプ単体では噴射率と噴射タイミングの制御が独立して行えないため、油圧式の電子制御タイマを組み合わせで独立制御を可能としたものもある。

さらに、噴射圧力の高圧化や主噴射の前に微量の燃料を噴射して燃焼を制御するパイロット噴射機能の追加などが検討されている。

## (2) コモンレール式燃料噴射システム

圧力制御可能な高圧サプライポンプで加圧された燃料をインジェクタ部に設けられた電磁弁により噴射制御するシステムで、噴射圧力、噴射タイミング、噴射量の制御が自在にできることと、噴射圧力がエンジン回転数に依存しないのが特長である。(図11)

噴射制御の自由度が大きく、エンジン本体の大変更を要しないため、将来の噴射系として有望視されている。

## (3) 電子制御式ユニットインジェクタ

各気筒のインジェクタ部にカムで駆動されるプランジャを設け、電磁弁により燃料供給をコントロールして、噴射タイミングと噴射量を制御するシステムで、噴射管がないため、高噴射圧化が容易である。(図12)

このシステムはエンジン本体の大幅な構造変更を必要

## 4. 将来技術

ここまで述べてきたとおり、ターボ過給ディーゼルエンジンはトラック・バス用エンジンとして好ましい特性を有しており、よりよいものとするため、数々の改良が試みられている。

### 4.1 燃料噴射システムの改良

排出ガスの低減と燃費改善に有効な給気冷却器付ターボ過給エンジンといえども、それだけでは今後さらに厳しくなる排出ガス規制に対応し、且つ、性能向上を図ることはできない。その鍵を握るのは燃料噴射システムであり、数々のシステムが実用化され、さらに将来に向けて改良が続けられている。

ここでは代表的な燃料噴射システムと将来展望を紹介する。

#### (1) プレストローク制御式燃料噴射ポンプ

従来の列型噴射ポンプに噴射率(噴射圧力)と噴射タイミングを電子制御する機能を付加したポンプで、エン

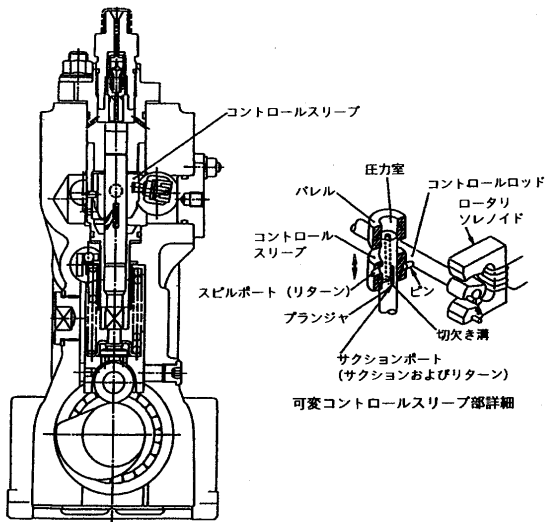


図10 プレストローク制御式燃料噴射ポンプ

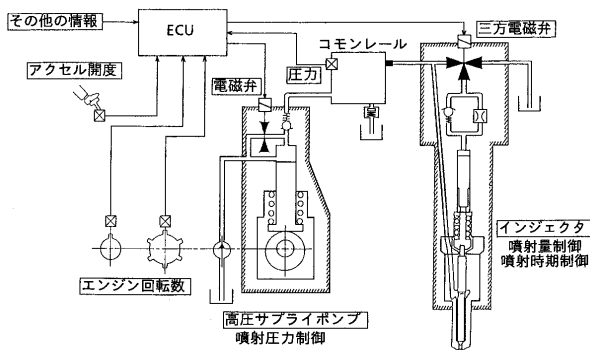


図11 コモンレール式燃料噴射システム

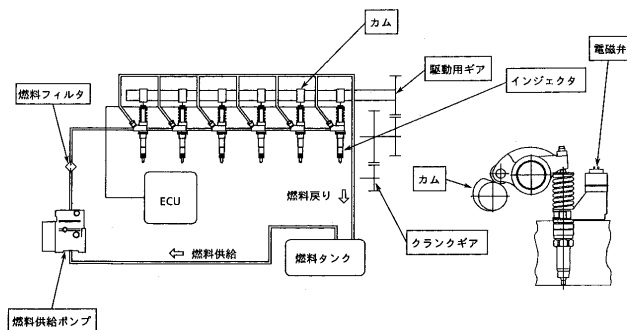


図12 電子制御式ユニットインジェクタシステム

とすることから、既存エンジンへの適用は難しい。

また、エンジン回転数に依存する噴射圧力をいかにして制御可能とするかがキーポイントである。

#### 4.2 過給システムの改良

過給機としてのターボチャージャは既述のような改良が加えられているが、さらなる性能向上を目指し、過給システムの中に他の機器を組合せた様々な改良研究が行われているため、その一例を紹介する。

##### (1) ターボコンパウンドシステム

ターボコンパウンドシステムはターボチャージャから出た排気でパワータービンをまわして、エネルギーを回収

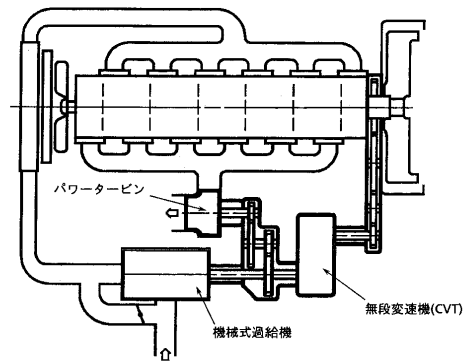


図13 機械式ターボコンパウンドシステム

し燃費を改善するシステムである。

このシステムは高負荷域の燃費改善には有効であるが、部分負荷域の改善代が少ないことや過渡特性の改善が望めないなど自動車用としては好ましくない特性があるため、実用化された例は少なく、さらに研究が進められている。

##### (2) 機械式過給ターボコンパウンドシステム

前述のターボコンパウンドシステムの短所を克服するシステムとして研究されているものに機械式過給ターボコンパウンドシステムがある。

このシステムは機械式過給機とパワータービンを組合せ、過渡特性の改善とパワータービンのエネルギー回収による燃費低減をねらい、開発研究が進められているものである。

低回転域では、過給機をエンジン軸出力から駆動してレスポンスを向上し、中高回転域では、パワータービンで過給機を駆動すると同時に余剰動力をエンジン出力軸へ伝達して燃費低減を図っている。

図13にシステムの概要を示すが、過給機および駆動系の効率向上に成否がかかっている。

## 5. あとがき

排出ガス規制の強化、燃費低減の市場要求の観点から、トラック・バス用ディーゼルエンジンが全て過給化される日も遠くないものと考えられ、過給技術のさらなる改良が望まれる。

なかでも、ターボチャージャの効率向上、レスポンス改善がキーポイントであり、エンジン開発と併行した改良研究が必要である。

高効率で燃費が非常に良好なことから商用車用に最適なディーゼルエンジンであるが、よりクリーン・省資源で地球に優しいエンジンとなるように、一層の努力を傾けていきたい。

## 参考文献

- (1) 宮下, 他: 「自動車用ディーゼルエンジン」, 山海堂, 1994
- (2) VOLVO 社カタログ
- (3) 自動車工学「第31回東京モーターショー」, Jan. 1996



## 特集・ターボチャージャ

## 乗用車用ターボチャージャの技術動向

鈴木 年雄<sup>\*1</sup>

SUZUKI Toshio

## 1. まえがき

乗用車用ターボチャージャ（以下ターボと略す）の技術動向という主題で執筆をお受けしました。世界中の多くの乗用車メーカーと取引のある弊社の立場から、今後5年間程度の間、量産採用の可能性のある技術の中で、どのようなものに興味をもたれているかという観点でまとめてみました。

## 2. ターボ装着率に関する地域による特異差

乗用車の生産台数に関しては、北米、欧州及びアジア（主として日本）の3地域に分けて検討する。

## 2.1 北米市場

商用車用ディーゼル向ターボとしては最大のマーケットであるにもかかわらず、乗用車用（ピックアップトラックを除く）ターボに関しては、極く限られた機種で少量使用されるにとどまると思われる。使われるターボに関しても、技術的に特に注目すべきものはない。市場調査の結果でも、乗用車用ディーゼルには強い抵抗がある事が明らかである。ガソリンエンジンの場合に、出力が必要なら排気量を大きくするというのが、米国自動車メーカーの基本的な考え方である。燃料の価格に大変動が起らない限り、この傾向は変わらないものと思われる。この様な背景で、北米で生産される乗用車にディーゼルが採用される可能性はきわめて低いと思われる。

但し、ユーザーの間にターボ付ガソリンエンジンに抵

抗がある訳ではないので（スポーツタイプの車の保険料が著しく高い等の問題はあ）他地域から輸入される車についての成否は、その他の要素で決まるものと思われる。

## 2.2 欧州市場

欧州の乗用車においてはディーゼルの採用が著しい伸びを示している。欧州全体のディーゼル装着率の過去の推移と将来の予測を図1に示した。弊社では今までの著しい伸びに比べると、今後はかなりなだらかな伸びになると予測している。欧州においてディーゼルの装着率が高い理由としては以下が考えられる。

- 1) 一般ユーザーの間では、ガソリンエンジンよりディーゼルの方が排気ガスによる大気汚染が少ないと考えられている。即ち CO<sub>2</sub> による地球温暖化の影響に関心が高い。
- 2) ディーゼル付車両の走行性能がガソリンエンジン付に比べて、あまり遜色がない。
- 3) 燃料代の差

乗用車におけるディーゼルの割合を、登録ベースで国別に比較してみると、表1のようになる。ガソリンと軽油の実勢価格差を国別に調べた結果を表2に示す。これらを比べてみると、一般的には軽油が安価な国ではディーゼル車の割合が高いが、必ずしも燃料の価格差と連動していない事が判り興味深い。

表1 欧州における乗用車のディーゼル装着率，％  
(1996年1月～8月の累積，登録ベース)

| 国名       | フランス | ドイツ  | イギリス | イタリア | ベルギー | スペイン | オーストリア | オランダ | 欧州全体 |
|----------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|
| ディーゼル装着率 | 38.9 | 15.0 | 18.0 | 15.2 | 44.0 | 38.2 | 48.5   | 15.5 | 22.3 |

表2 欧州における燃料価格差  
(ガソリンの価格を100とした時の軽油の価格，  
1996年4月実勢ベース)

| 国名   | フランス | ドイツ | イギリス | イタリア | ベルギー | スペイン | オランダ | デンマーク | ギリシャ | アイルランド | ルクセンブルグ |
|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|------|--------|---------|
| 軽油価格 | 81   | 79  | 100  | 80   | 71   | 79   | 74   | 83    | 74   | 94     | 81      |

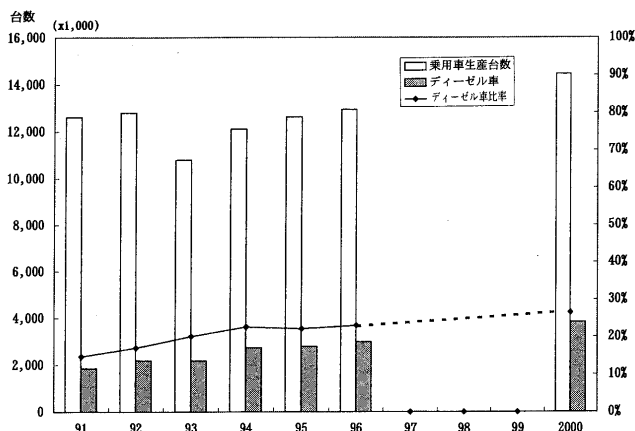


図1 欧州におけるディーゼル乗用車の生産台数

原稿受付 1997年1月7日

\*1 ㈱ギャレットターボ

〒108 港区三田3-13-16 三田43森ビル4F

ディーゼル乗用車におけるターボの装着率の過去の推移と将来の予測を図2に示す。

一方、ガソリンエンジンに関しては、1995年の実績ベースでターボ装着率は欧州全体として1.62%に過ぎない。今後は小型エンジンを中心として、装着率はある程度伸びる事が予測されるが、絶対数としてはわずかな増加しかないと思われる。技術的にはいわゆる低過給による低速トルクの向上が主で、ターボの技術という面からは特記するようなものではない。

### 2.3 日本市場

自動車メーカー各社におけるエンジンの開発は、海外市場向と国内市場向に分けられる。海外市場、特に欧州市場向に関しては、基本的に欧州における傾向と同様である。国内市場においては、ディーゼルエンジンの排気ガスが大気汚染の最大原因であるように言われており、一般ユーザーもディーゼルに対してあまり良いイメージを持っていないと言える。欧州でディーゼル車を成功させているVWでさえ、1995年に日本で販売した乗用車36,000台強の内、ディーゼル車はわずか1.5%に過ぎない。その様な背景のもとに、セダン系乗用車へのディーゼル装着率が飛躍的に上昇するとは考えにくい。

一方でRV車においては、既にディーゼルの装着率はかなり高く、今後もこの傾向は続くものと思われる。RV用ディーゼルにおけるターボの装着率は出力アップと排気ガス対策の為に着実に増加すると予測される。ターボ付ディーゼル車(含RV)の国内生産台数推移を図3に示す。またターボ付ガソリン車の生産台数も同じ図3に示す。ガソリン車へのターボ装着率は、一時程の勢いはなく、横這いが続いており、当分の間はこの傾向が続くものと予測している。

## 3. 技術動向

乗用車用ターボに関してターボメーカー各社が紹介している技術としては、基本的な設計変更による流量特性の改善、イナーシャの低減、フリクションの低減に加えて、以下のものが知られている。

セラミック製タービンホイール  
チタンアルミ製タービンホイール  
プラスチック製コンプレッサーホイール  
軸流タービン  
ミックスフロータービン  
ボールベアリング  
アブレードブルタービンハウジング  
アブレードブルコンプレッサーハウジング  
鋳鋼製薄肉タービンハウジング  
ツインスクロールタービンハウジング  
ポーテッドシュラウド  
ウェストゲートの電子制御  
可変ノズルタービン

これらの技術の内、特に注目度の高いものに関して考察する。

### 3.1 VNT, 可変ノズルタービン

上記の技術の内、現在もっとも注目されているのがVNTである。VG, Variable Geometry と呼ばれているが、どのGeometryなのかを明確にする為に、弊社ではVN, Variable Nozzle と呼んでいる。特にVNTは直噴のディーゼルに関しては排気ガス対策としてこれしかないと言われている。弊社の知る限りでは、日本及び欧州において少なくとも15社の乗用車メーカーが弊社または他のメーカーのVNTを使って、ディーゼルエンジンの開発を進めている。一部は研究段階のものもあるがほとんどは既に開発の段階に進んでいる。これらのメーカーにおいても、先に列記した技術も評価した上で、最終的にVNTを選んでいる事から、エンジン開発技術者にとって、十分に使用価値が認められていると言えるのではないだろうか。

弊社のウェストゲート付ターボとVNTターボを市販の1.9リットルのディーゼルエンジンを使って比較した性能データの内、VNTの特徴を良く現しているものを図4に示す。ウェストゲートもVNTも排気ガス流量を制御する事により、ブーストをコントロールするが、ウェストゲートの場合にはゲートが閉じた状態でも、一定量

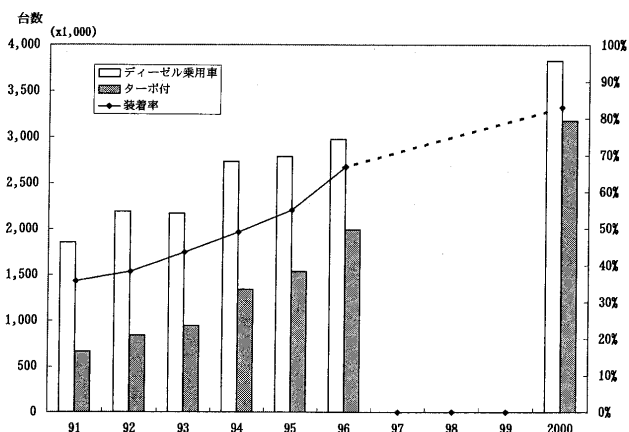


図2 欧州におけるディーゼル乗用車のターボ装着率

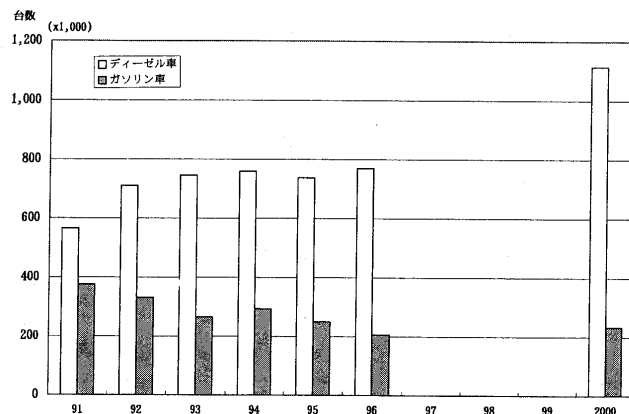


図3 国内ターボ付乗用車(含RV, 除軽)の生産台数

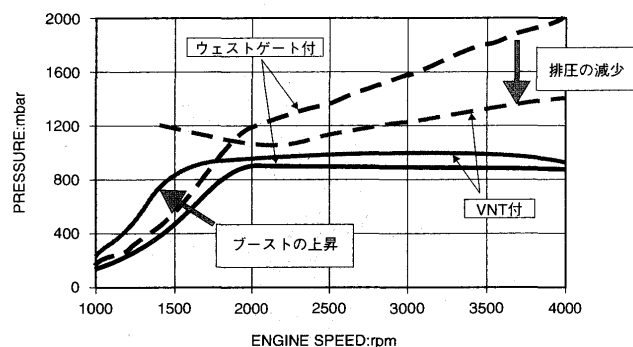


図4 ウェストゲート付とVNT付の性能比較  
(1.9 l ディーゼルに GT 15 と VNT 15 を装着)

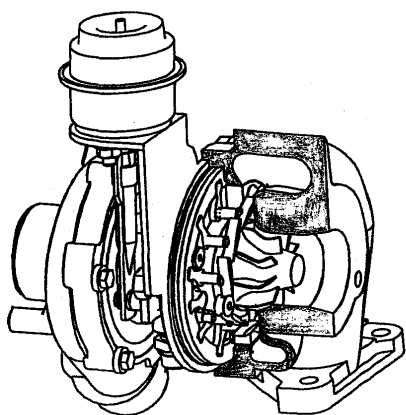


図5 VNT 15 のカットモデル

の排気ガスが流れる構造となっており、その流量に応じたブーストしか得られない。これに対して、VNTにおいては排気ガス流量は限りなくゼロに近づける事ができる。排圧は高くなるがそれに応じてブーストが上昇する。一方高速側で両者が全開の状態と比較すると、ウェストゲートより VNT の方が流量抵抗が少なく、同レベルのブーストを得るには VNT の方が排圧が低くなる。両者の長所を生かす為にウェストゲート付 VNT も開発されているが、構造が複雑となり、コストも高いものになる。

欧州においては特定の車種の中で、ターボ付ディーゼル車が最上位に位置づけられているものもあり、VNT の価格もそれなりに許容される場合もあるが、ウェストゲート付に比べて 2 倍強の価格は現在 VNT がかかえている最大の課題である。VNT 15 のカットモデルを図 5 に示す。この課題に対して弊社では構造、材質、製造方法等あらゆる面から検討を進めている。それらの内に OP (One Piece) と呼ぶ構造がある。OP に対して、従来型の VNT はマルチベーンと呼んでいる。その違いを図 6 及び 7 に示す。マルチベーン型では、それぞれのベーンがベーンの軸を中心に回転し、ベーン間を通過するガス流量を制御する構造となっている。これに対して OP では、複数のベーンが固定されている筒が、その筒の軸方向にスライドし、ベーン間を通過するガス流量を制御す

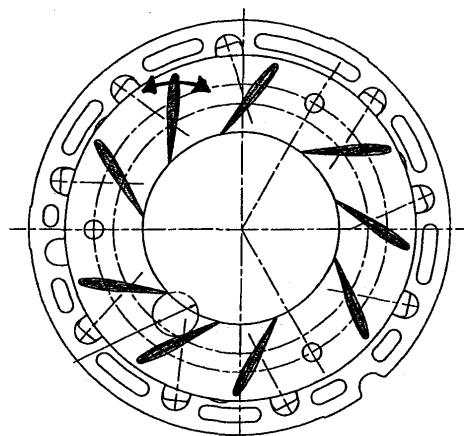


図6 VNT 15 のベーン  
(マルチベーン型では総てのベーンが連動で可変、OP 型では固定)

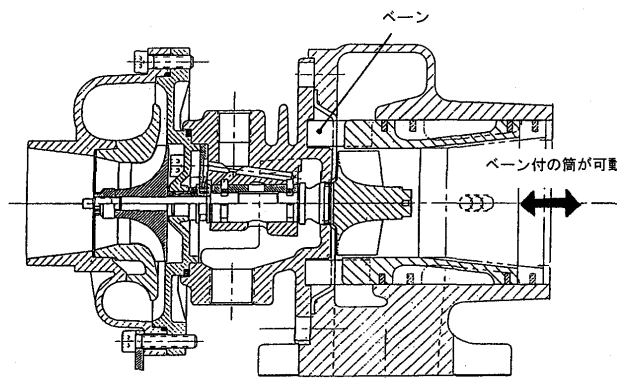


図7 VNTOP の断面図

る構造である。

OP の目標価格はウェストゲート付の 1.5 倍以下に設定しているが、未だ開発が完了していない。OP のベーンはシュラウドにもうけられたベーンと同じ形状の孔に挿入されている。タービンの効率を保つ為にはベーンと孔のすき間を出来るだけ小さく保つ必要がある。高温の排気ガス雰囲気の中でこの条件を満たす為には耐酸化性に秀れた材料を使って、加工公差を厳しくすれば良いが、それでは目標価格を達成するのが難しくなる。またベーンがとりつけられている筒とハウジングとの摺動部も、ガス漏れを防ぎつつ、滑かに摺動し、十分な耐久性を確保する必要がある。これらの技術的課題を満たしながら低価格におさえる事は容易ではない。

ディーゼルエンジンの燃費をウェストゲート付と VNT 付で比較したデータの例を図 8 に示す。この例では VNT 付の方が実用域において 15% 程度良くなっている。これは排圧の差から容易に理解出来る。更に図 9 に示すように部分負荷の状態では VNT のベーン開度を制御すると 10~15% 程度の燃費改善が得られる事が確認されている。これは、それぞれのエンジン回転においてベーンの開度を制御する事により、エンジン入出口の差圧が変化し、それによって燃費が変化する事を表している。

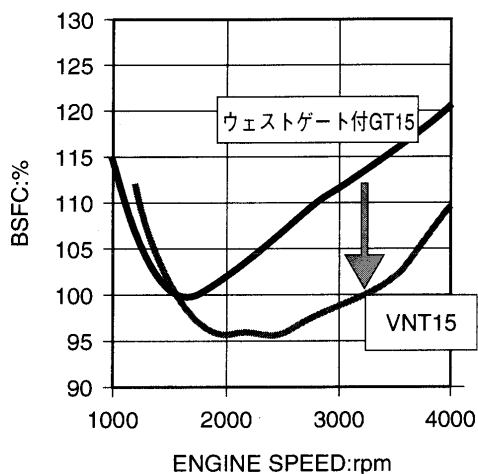


図8 GT15とVNT15の燃費比較  
(1.9 l ディーゼル使用)

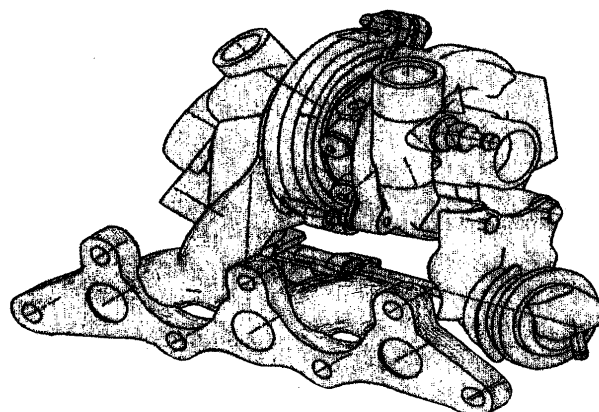


図10 排気マニホールドとの一体型

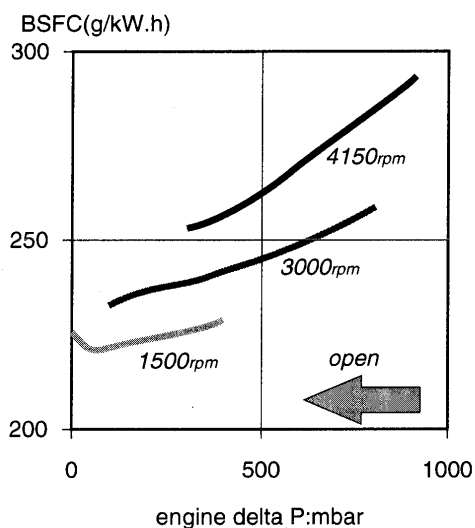


図9 部分負荷時の燃費改善  
(1.9 l ディーゼル使用, それぞれのエンジン回転で  
ペーンの開度を制御した場合の燃費)

以上を要約すると、乗用車用ディーゼルに関してはVNT化が進み、そのペーンの開度を電子制御する技術が最大の動向といえる。

### 3.2 小型軽量化

VNTが注目されているとはいえ、ウェストゲート付が主流である事には変りはない。2000年頃にターボ付ディーゼルの約1/3程度がVNT、残りがウェストゲート付と予測している。このウェストゲート付ターボに関しては、小型軽量化と低価格化が2大要求といえる。この両方の要求を満たす手段として、タービンハウジングと排気マニホールドの一体化が欧州各社で進められている。その1例を図10に示す。ここで注意しなければならないのは、一体化にして低価格を達成する為には、 casting 方法を考慮した設計にする必要があり、マニホールドの形状が決ってから一体化したのではむしろ割高になる事である。

### 3.3 ガソリンエンジン用ターボ

ガソリンエンジン用に特有の技術としては、触媒の点火を早める為にタービンハウジングの熱容量を下げる要求がある。その手段として鋳鋼による薄肉化が検討されている。また軸受の摩擦を減らす目的でボールベアリングの採用が拡大すると予測される。

### 参考文献

使用した資料は総て社内資料である。

## 特集・ターボチャージャ

## トラック・バス用ターボチャージャの技術動向

近藤 暢宏\*1

KONDO Nobuhiro

## 1. まえがき

トラック・バス用ディーゼル機関は各種輸送手段のなかでも中心的な役割を果たしている。そのうち中・長距離輸送には高出力・低燃費を目的としてターボチャージャ付きディーゼル機関が採用されており需要は年々増加している。

一方、環境保全の観点から世界各国の排出ガス規制は年々厳しくなっている。日本の規制値を図1<sup>(1)</sup>に示す。

この規制に対応するため、トラック・バス用ディーゼル機関は燃焼状態の改善による排気ガスの浄化と燃料消費率の向上に寄与するターボチャージャ付きとしたディーゼル機関が増え、改良の各種研究開発がすすめられている。本稿ではトラック・バス用ターボチャージャの最近の技術動向について概要を紹介する。

## 2. ターボチャージャの一般的構造

トラック・バス用ディーゼル機関に搭載されるターボチャージャの例としてIHI製RHEシリーズターボチャージャの構造を図2<sup>(2)</sup>に示す。排出ガスエネルギーを受け入れるタービンと空気を圧縮してエンジンに空気を送るコンプレッサーを回転軸の両端に位置させ、中央部分に軸受け部を配し、軸受け供給油をシールするセンターセクションがある。一般的には軸受け部への給油はエンジンのシステム油が使用される。

タービンインペラの形式にはラジアルタービンの使用が一般的である。本図に示す斜流タービンが高効率、ワイドレンジの特長がありトラック・バス用向けに、最近開発が行われた。タービンインペラの外周にはガスを導入するスクロール状のハウジングを有している。タービンハウジングは排気ガスパルスを有効に使用するために2分割型としたものが殆どである。又、用途上エンジン低速域での出力特性を重視する機関では、エンジン高速域で排気ガスの一部をタービンインペラを通さずバイパスさせて給気圧を制御するウェイトゲートバルブシステムの採用例も多い。ウェイトゲートバルブの開閉コントロールには給気圧を使用するのが一般的であるが、電子コントロールタイプとし給気圧以外をパラメータとしているものもある。更に高性能機関ではタービンノズル

| 車種                 | 新型車適用時期     | 継続生産者適用時期  |
|--------------------|-------------|------------|
| 乗用車                |             |            |
| 小型(IW1.25t以下)      | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 中型(IW1.25t超)       | H. 10年10月1日 | H. 11年9月1日 |
| トラック               |             |            |
| 軽量(GVW1.7t以下)      | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 中量(GVW1.7t~2.5t)MT | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 中量(同)AT            | H. 10年10月1日 | H. 11年9月1日 |
| 重量(GVW2.5t~3.5t)   | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 重量(GVW3.5t~12t)    | H. 10年10月1日 | H. 11年9月1日 |
| バス                 |             |            |
| 軽量(GVW1.7t以下)      | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 中量(GVW1.7t~2.5t)MT | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 中量(同)AT            | H. 10年10月1日 | H. 11年9月1日 |
| 重量(GVW2.5t~3.5t)   | H. 9年10月1日  | H. 11年7月1日 |
| 重量(GVW3.5t~12t)    | H. 10年10月1日 | H. 11年9月1日 |

IW: 慣性重量 GVW: 総重量

図1 ディーゼル自動車 平成9年、10年排出ガス規制対策適用日

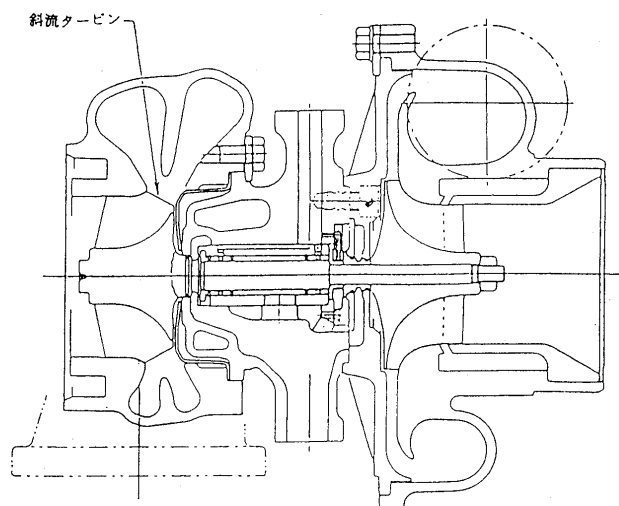


図2 RHE形ターボチャージャ断面図

部に複数枚のベーンを配し、機関の運転状態に応じてタービンインペラへのガス流入角度を変えられるようにした、可変容量ターボチャージャがある。

コンプレッサーインペラはトラック・バス用の要求特性であるワイドレンジ、高効率化を狙いとして、羽根出口部にバックワード角及びレイク角を備えた遠心式である。又、コンプレッサーインペラの材質は温度、圧力比等の使用条件、コストを考慮し、アルミ鋳造性の採用が殆どである。

ベアリングはジャーナルベアリングとスラストベアリングとで構成される。ジャーナルベアリングは、回転安定性の確保のため内外周に油膜のあるフルフロート軸受けが採用されている。スラストベアリングは、エンジンの負荷状態によって変動するスラスト力にたいして、十分な負荷能力を保持するとともに、メカニカルロスの低減を狙いとして傾斜パッド型が用いられている。

原稿受付 1997年1月28日

\*1 石川島播磨重工業㈱ 〒135 江東区豊洲3-2-16

### 3. トラック・バス用ターボチャージャの課題

容積型機械のレシプロエンジンと速度型機械のターボチャージャとではタイプの違いによる基本的な特性の違いがあり、単体性能のみならず、システム開発を含む改良が不可欠である。中でも前述の特性の違いから生ずる過渡応答特性の遅れの解消は車両用ターボチャージャの大きな課題となっている。過渡応答特性はエンジンとターボチャージャとのマッチングの他に、ターボチャージャの種々の要素が影響する。流体性能の改良、機械効率の改良、慣性モーメントの減少などが効果がある。図3<sup>(2)</sup>にターボチャージャ側の過渡応答性の影響因子を示す。

高速道路網の整備による輸送の高速化が進んでいることや、大型車の重量規制が25 ton化と重くなったこと等により、エンジンの高出力化への要求は強くなっている。更に、輸送コストの低減の目的で低燃費化の要求が出され、ターボチャージャは効率向上、作動範囲の拡大、高圧比化への対応が不可欠となっている。

排出ガス規制対応としてEGR（排気ガス再循環）システムがNO<sub>x</sub>低減に有効である。ターボチャージャ付きディーゼル機関においては、給気圧力が排気ガス圧力より高くなっており、EGRガスが給気側に戻りにくい圧力バランスになっている。燃費改善の目的で、タービン・コンプレッサの流体性能改善及び、軸受け部のメカニカルロスの改良が図られているが、これらの効率改良はますますEGRガスを戻りにくくしている。つまりターボチャージャの効率改善は燃費改善には有効であるがEGRシステムのガスを還流してNO<sub>x</sub>を低減すること

| 要 因         | 項 目    | 対 応 例                   |
|-------------|--------|-------------------------|
| 効率          | 圧縮機効率  | 流力特性改善<br>アブレードブルコーティング |
|             | タービン効率 | 流力特性改善                  |
|             | 機械効率   | 低機械損失軸受け、ボール軸受け化        |
| 流量特性        | 圧縮機効率  | 小型ハイフロー型、斜流型            |
|             | タービン効率 | 小型ハイフロー型、斜流型            |
| 慣性<br>モーメント | 圧縮機材料  | アルミ合金から樹脂へ              |
|             | タービン材料 | 耐熱合金からセラミックス、TiAlへ      |

図3 過渡応答性に影響するターボチャージャ側因子

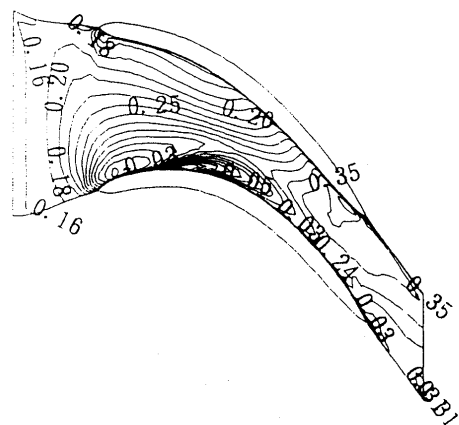


図4 タービンインペラ内のマッハ数分布図

とは相反する結果となっており、両者を同時に成立させるシステム開発及び単体での改良・開発が必要となっている。

ターボチャージャは自動車用部品の一部という観点から、トラック・バス用として100万km以上の走行寿命と低コスト化が要求され、これらに応じて行かなければならない。寿命に影響を与えるのは、メタル部等の摺動摩耗、ケーシング類の熱劣化（亀裂・変形）、回転部インペラ類の疲労等の問題があり、市場状況の変化に対応しつつ目標寿命を達成すべく各種改良がなされている。

### 4. 技術動向

#### 4.1 流体性能の改良

##### 4.1.1 効率の向上

タービン、コンプレッサの各々の効率はエンジン性能に影響を及ぼし、各種手法を用いてその向上改善がなされている。最近においては従来手法に加えてCFDが利用されるようになった。これにより直接計測の困難なインペラ等の内部流れ状態の推定などが容易となり、効率向上に貢献している。図4<sup>(3)</sup>にタービンインペラ内の流れの解析例を示す。現状の流体性能はかなり高度なレベルにあり、その改良度合いは年々鈍くなってきている。流体性能の解析による改良だけでなく、補助機能部品を追加して性能の改善が図られてきている。コンプレッサのインペラとケーシングとの間にアブレードブルシールを行って、クリアランスを減少させ、3%の効率改善がなされている。アブレードブルシールの採用構造例を図5<sup>(4)</sup>に示す。

##### 4.1.2 流量特性の改善

車両用としてディーゼル機関は低回転数域でのトルクが必要であり、ターボチャージャはエンジン低回転数域から高いブースト圧を発生するよう要求される。エンジンの全回転数域においてバランス良い流量特性が得られる斜流タービン流量特性の例を図6<sup>(1)</sup>に示す。

低速を重視するマッチングには、少容量タービンを用

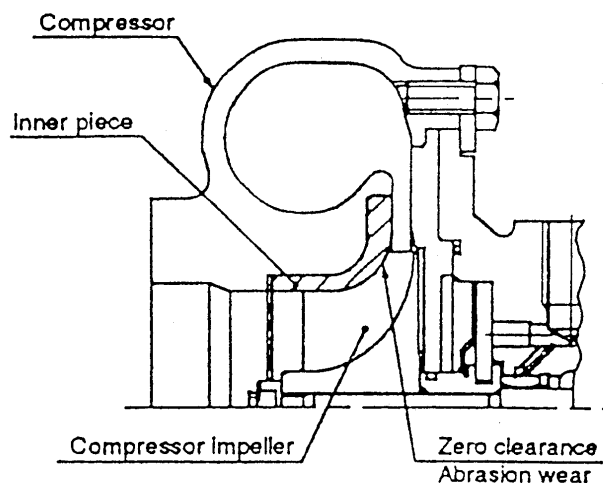


図5 アブレードブルシール採用例

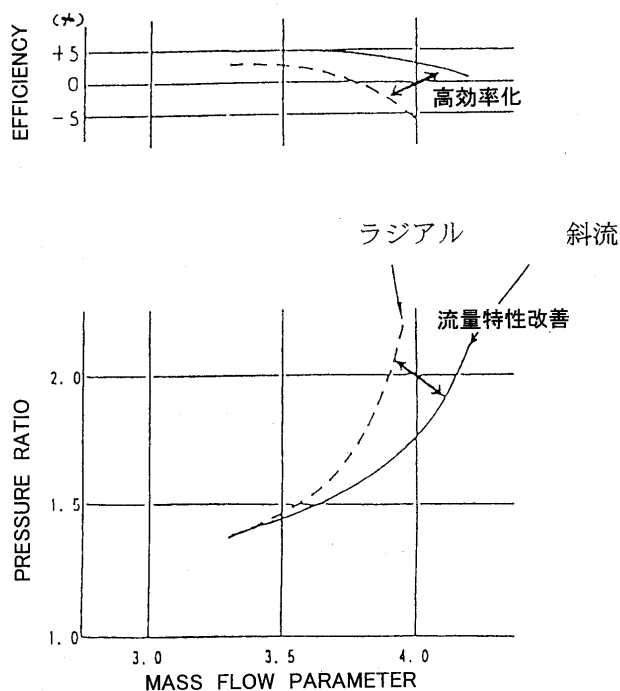


図6 タービン性能曲線

| 項目                                   | TiAl      | セラミックス  | 耐熱合金     |
|--------------------------------------|-----------|---------|----------|
| 材料                                   | 33.5wt%Al | Si3N4   | Inco713C |
| 密度 $\text{g/cm}^3$                   | 3.8       | 3.2     | 7.9      |
| ヤング率 Gpa                             | 200       | 310     | 220      |
| 熱膨張率 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | 10.3      | 2.8     | 13.1     |
| 伸び %                                 | 3~5       | 0       | 5        |
| 耐酸化性                                 | 1         | 0.3     | 3        |
| (100h酸化量) $\text{g/m}^2$             | 700°C繰返し  | 950°C連続 | 900°C繰返し |
| 比強度(700°C) $\times 10^6 \text{ mm}$  | 15.2      | 21.4    | 11.6     |
| 破壊靱性X1C $\text{MNm}^{3/2}$           | 43        | 6       | 79       |

図7 タービンインペラ材料の比較

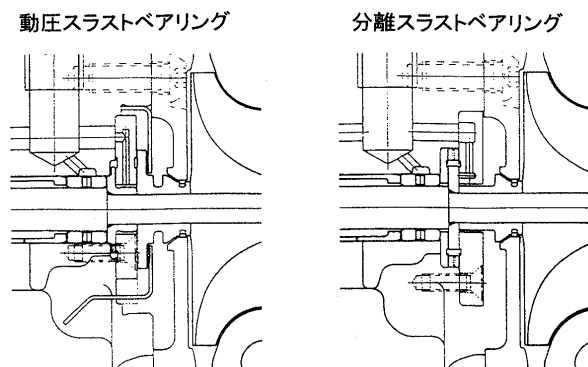


図8 スラストベアリング構造比較図

いディーゼル機関低回転数域で高いブースト圧を発生させ、高回転数域ではガスをバイパスさせるウェイストゲートバルブシステムを採用する例が多い。ウェイストゲートバルブシステムにおいても、斜流タービンはワイドレンジの特徴から良い機関特性を得る事ができる。

さらに機関の性能を改善するにはタービン容量特性を可変とするVGSシステムがある。VGSシステムとしては各種形式があるが、ディーゼル機関用としてはスクロールとタービンインペラとの間に複数枚の可変ノズル翼を配し、ノズル翼の向きを変えてスロート面積及びガスの流入角を変化させ、容量変更を行うVGSシステムが一般的である。エンジン全回転数範囲で効率をキープしながら希望のタービン容量を得ている。

#### 4.2 慣性モーメントの低減

車両の発進特性にはターボチャージャの慣性モーメントの大きさが影響する。ターボチャージャ単体の慣性モーメント低減には流体性能の高NS化をはかり対応してきている。

更に材料の面から各種アプローチがなされている。特に乗用車用ターボチャージャには各種試みがなされ、コンプレッサインペラ側に樹脂製を採用したり、タービン側にセラミックを採用した例がある。トラック・バス用においては、高周速であり応力が高くなることと、100万kmを超える長寿命要求である等の観点から採用されている例はまだないが、注目される技術である。

最近トラック・バス用ターボチャージャではタービン側に金属間化合物であるチタンアルミ(Ti-Al)が着目され各種研究がなされている。各種材料の特性比較を図7<sup>(2)</sup>に示す。

#### 4.3 機械効率の改善

軸受けはフルフロートタイプのジャーナルベアリングとスラストベアリングから成り立っている。乗用車用の小型過給機には、メカニカルロスを少なくする目的でボールベアリング式の採用が進んでいるが、トラック・バス用においては寿命及びメンテナンスの観点から、フルフローティングタイプが採用されている。スラストベアリングはメタル両面にパッド面を持ってスラスト力を受けている。スラストベアリングはパッド面に複数のテーパランドを持ち内径側から油を供給する構造で、一般的には動圧式と言われている。この他にパッド面に直接給油するセミ静圧式も採用が進んでいる。本形式のスラストベアリングはスラスト力を受けていない側の隙間が大きくなり、多くの油を排出している。このためスラストベアリングに供給される油は全供給油量の70%にもなり、この排出油の攪拌ロスがメカニカルロスの大きな部分を占めている。近年、メカニカルロスを少なくする技術が開発されてきている。その一例として分離スラストタイプがある。本構造と従来タイプの比較図を図8に示す。従来タイプが一個のスラストベアリングと、その両面にスラストカラーがあるのに対し、分離スラストタイプは一個のスラストカラーとその両面に各々独立したスラストベアリングがある。スラスト力の大きい正スラストサイドは専用給油として十分な給油を確保し、スラスト力の小さい反スラスト面には、ジャーナルベアリングの油を利用している。本構造においては、スラストベアリングへの給油量が1/3に減少しメカニカルロスも約70%と大幅に低減する。各ベアリング形式のメカニカル

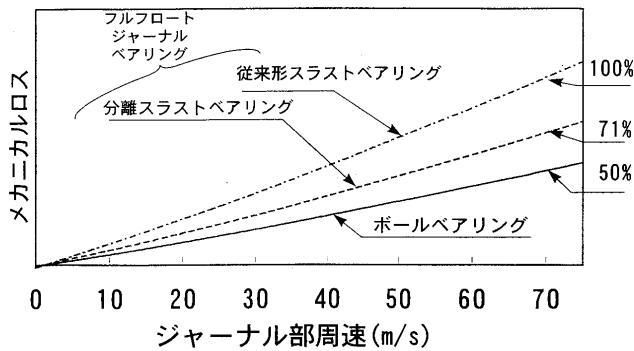


図9 メカニカルロスの比較

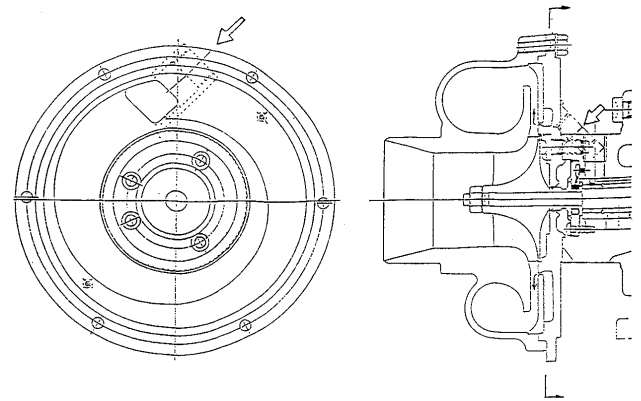


図10 EGR ポート付き過給機構造図

ロスを図9に示す。

#### 4.4 排気ガス規制対応

排気ガス規制としてはパティキュレートと $\text{NO}_x$ に対応していかなければならない。技術的にこの2者を同時に改良することは難しく、一方を良くすれば一方が悪くなる場合が殆どである。ターボチャージャ付きディーゼル機関は空気量の確保が容易であり、パティキュレート改良に対しては有効であるといわれている。一方、 $\text{NO}_x$ の改良はディーゼル機関側で各種改良が行われているが、その中でもEGRが有効といわれ、小型ディーゼル機関での採用が多くなってきている。ターボチャージャ付き機関の場合、機関の各負荷運転状態において、空気給気圧力が排気ガス圧力より高くなっており、排気ガスが給気側に戻りにくくなっている。又、排気ガスをターボチャージャのコンプレッサの前に戻した場合はEGRが可能となるが、高応力部品であるコンプレッサインペラが、排気ガス成分により腐食され、信頼性を損ねてしまう。つまり、ターボチャージャ付き機関の場合、EGRへの対応が難しくシステムを含めた開発が必要となってくる。この対応として、EGRガス戻りポートをコンプレッサのディフューザ部に設けたターボチャージャの開発が進められている。図10にその断面図を示す。ターボチャージャのコンプレッサ各部の圧力分布例を図11に示す。EGRガスの還流場所としてインペラ前流(①)はインペラの腐食による寿命低下や、汚れによる性能低下がある。インペラの背面(②)高応力部がEGRガスによりインペラが温められて強度低下が起り、寿命に影響を与える。ディフューザ部(③)の場合は前述に比べ静圧圧が高くなってEGRガスが戻り難くなるが、前述のマイナス要因がなく、良好な結果が得られる。本構造において、ディーゼル機関の運転状態によるが最大20%程度のEGRガス循環率が得られている。

#### 5. あとがき

トラック・バス用ターボチャージャは今後ますます厳しくなっていくと推定される排気ガス規制や燃費規制に対し有効なデバイスの一つであり、その重要度は増えて

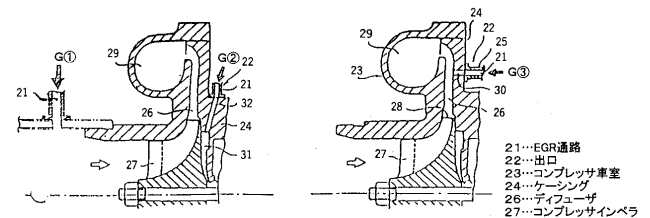


図11 ターボチャージャへの各部圧力

いき更なる改良改善が行われていくであろう。今後の開発は自動車の他の機器に見られるように、メカニカルとエレクトロニクスの融合により、更に進んでいくものと期待している。

#### 参考文献

- (1) 三堀, IHI RHE シリーズ ターボチャージャ, GTSJ21-81 (1993), 64-5
- (2) 池谷, ターボチャージドエンジンの過渡応答特性, ターボ機械 24-9 (1996), 38-42
- (3) H. Minegishi et al., Development of a Small High-Response Mixed-Flow Turbine for Turbochargers, IGTC-78 (1995), 155-60
- (4) 諸富等, 新型日産「テラノ」搭載 TD27 Eti エンジンの開発, 内燃機関, Vol. 34 No. 435 1995.12



## 特集・ターボチャージャ

## ターボチャージャの技術応用展開

宮下 和也<sup>\*1</sup>

MIYASHITA Kazuya

## 1. 概要

ターボチャージャは圧縮機とタービンという2つの要素を併せ持ち、且つ、小型軽量にして低コストという優れた商品特性を有している。それ故、本来の用途である自動車用あるいは船舶用エンジン等の過給のみならず、種々の分野への応用が試みられてきた。

特に、遠心圧縮機は外径 30 mm クラスの精鑄インペラから、900 mm を越える大径インペラまで多種多様のメニューが揃っており、タービンもそれに対応して小径のラジアル型から大容量の軸流タービンまで多様で応用分野が極めて広い。

ここでは、ターボチャージャの代表的な応用技術分野として、小型ガスタービン、燃料電池用タービン圧縮機、空気式冷凍システム等の例について概要を紹介する。

## 2. 小型ガスタービンへの応用

端的に言えば、ターボチャージャに燃焼器を追加して軸動力を取り出せばガスタービンとすることが出来る。

近年、小型燃焼器、高速発電機等の技術開発が急速に進むと共に、ディーゼルエンジンの排ガス問題が重視されるようになった結果、小型ガスタービンへの応用例が米国を中心に盛んになって来た。<sup>(1)</sup>しかし、ガスタービンに適用するに当っては、次の様な技術課題がある。

## 2.1 基本的特徴と技術課題

## (1) タービン入口温度の高温化と熱対策

高温化はガスタービンとして使用するには避けることの出来ない課題である。即ち、エンジン過給用の場合は、タービン発生出力と圧縮機駆動力がバランスしたアイドルリング運転が基本であるのに対し、ガスタービンでは圧縮機駆動力に対してタービン出力に 30~50% 程度の余裕がなくてはならない。そのため、タービン入口ガス温度を高く設定し出力およびサイクル効率を上げる必要がある。

また、発電用ガスタービンとする場合は、エンジン過給用と違って回転数を常に 100% に保持する必要がある。更に、数千~数万時間の連続運転を要求されるのが一般的である。

それ故、タービン部分の材料・形状は勿論、圧縮機や

軸受部分を入念にチェックし、必要に応じて設計条件をレベルアップしなければならない。

## (2) 動力取出し方法と高速発電機

動力取出し方法は、1 台でガス発生機とパワータービンを兼ねる形式と、2 台のターボチャージャで分担する形式(図 1)がある。一般に数十 kW 以下の超小型ガスタービンでは 1 台(1 軸式)が多い様であるが、この場合、動力取出しは圧縮機吸込側へ軸を延長して発電機に接続している。即ち、高温のタービンから発電機を離して保護するために、タービンと圧縮機は背中合せに配置して軸受からオーバーハングとなっている。かつて、同様の構造を有する Aerodyne 型なるターボチャージャが開発されたことがあるが、<sup>(2)</sup>高速での回転安定性や軸受寿命に困難があり量産化には至らなかった。従って、本方式を実用化するには、然るべき技術的な改善が行われたと思われる。

一方、発電機もターボチャージャと直結する場合には、10 万 rpm 以上の高速回転が必要となるが、図 2 に示すように現在のところ数十 kW 以下の小出力に限られ、しかも、低コストの量産化技術は今後の進展を待たねばならない様である。

これに対して、ターボチャージャを 2 台に分ける型式では、ガス発生機は通常のターボチャージャと基本的に同じであり、パワータービンも圧縮機を外して、代りに減速機を配置することが出来るので、比較的実用化が容易と思われる。

## (3) 排熱回収用熱交換器(Recuperator)

第 3 の問題としては、排熱回収熱交換器の小型高効率

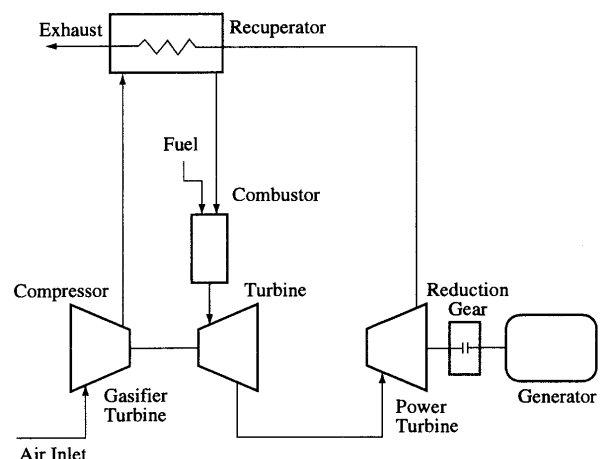


図1 小型ガスタービンサイクル (2 軸式)

原稿受付 1997 年 1 月 13 日

\* 1 石川島播磨重工業(株) 〒135 東京都江東区豊洲 3-2-16

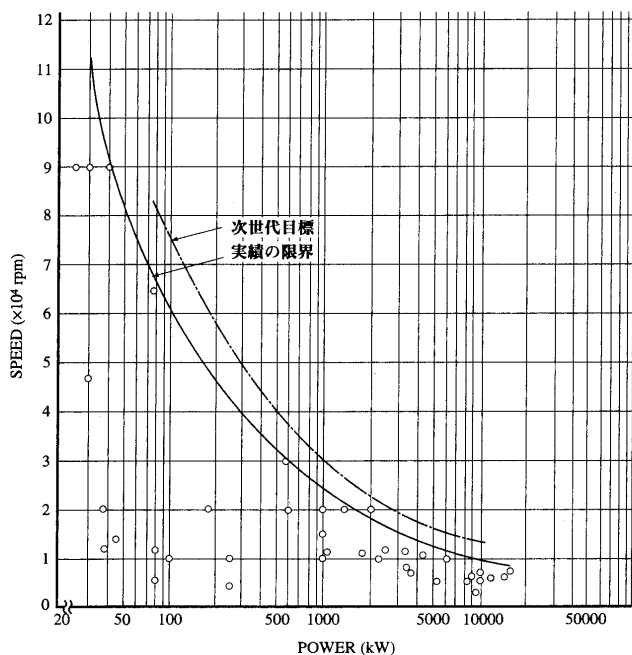


図2 高速発電機・電動機の回転数実績と出力限界

化の困難さがある。ターボチャージャの応用であるため、圧力比はせいぜい3~4程度であり、タービン入口温度を850°C前後に設定した場合、排温は600°Cを越えてサイクル効率は10数%にしかない。そのため高温の排熱を回収して再生サイクルとすることが不可欠である。この排熱回収熱交換器、即ち Recuperator はプレートフィン型が一般的であるが、全体のバランスから小型で高効率化、高熱負荷に耐えるような設計が技術的に重要である。

#### (4) 燃焼器、制御、潤滑方式等々

その他、ガスタービンであるからには、燃焼器は狭いスペースで効率の良い燃焼の実現と低 NO<sub>x</sub> 化が要求され、また、制御装置も負荷遮断に備える必要がある。

軸受潤滑方式では、フォイル型空気軸受の採用も見受けられるが、高温耐久性が油潤滑方式以上に大きな課題となろう。

### 2.2 小型ガスタービンへの応用例

現在、米国を中心に 100 kW 未満の独立電源として開発が進められている。しかし、前述した技術課題を解決するために、かなりの改造が加えられ、ターボチャージャの原型からは異なった構造になっているものが多い。

#### (1) 携帯用 2.6 kVA ガスタービン発電機<sup>(3)</sup>

日産自動車が乗用車用ターボチャージャをベースに開発したもので、図3に示すように1軸再生式の同期発電機直結型で回転数は100,000 rpm である。従来、この種の可搬式エンジンはレシプロエンジンの領域だったので、我が国では画期的な製品と言えよう。

#### (2) 自動車用 24 kW ガスタービン発電機

世界的ターボチャージャメーカーである米国の Allied Signal 系の2社が軍用に開発したものをガスタービン/

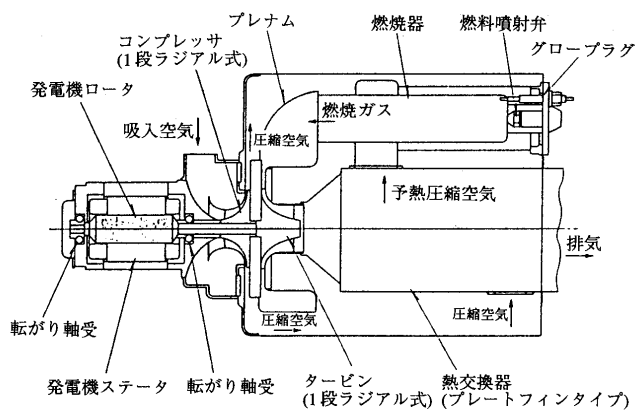


図3 可搬式 2.6 kVA ガスタービン

電気ハイブリッド動力としてバスに应用した。

Capstone 社によると、圧力比 3.25、ガス温度は 885°C であるが、Recuperator によって排温は 260°C 以下、効率 30% を達成している。<sup>(4)</sup> また、フォイル型の空気軸受を採用すると共に、NO<sub>x</sub>、CO は共に天然ガス焚で 9 ppm 以下と低く、カリフォルニア州の規制 (ULEV) をクリアして、1997 年にも実用化されそうな雰囲気である。図4にその構造を示す。

この他、Elliott 社も 35~45 kW の出力で外部給油式の小型ガスタービンを発表している。

#### (3) 定置型 2 軸 2 段式ガスタービン発電機

この型式では、米国 NREC 社の 2 軸式、即ち、2 台のターボチャージャを用いた独立型の 55 kW ミニコジェネ用ガスタービン発電装置がある。<sup>(5)</sup> 先に開発済の 30 kW クラスにつづいて、55 kW を開発したもので、圧力比 3、入口ガス温度 850°C にて効率 33% 以上となっている。図5に示すようにガス発生器のタービン排気がパワータービンに直接導かれ、コンパクトにまとめられている。パワータービンは堅型に配置され減速機を介して発電機を駆動している。排ガスは Recuperator により熱回収されているが、700°C の排熱を直接、吸収式冷凍機に使用する Version も開発中である。<sup>(6)</sup>

今のところ、実在のラジアル型ターボチャージャを応

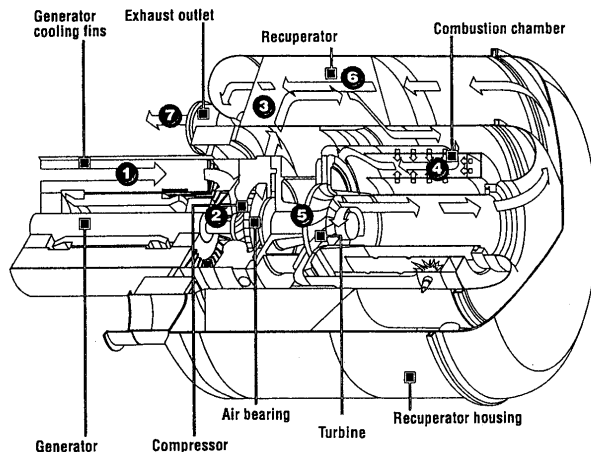


図4 バスエンジン用 24 kW ガスタービン



長時間の定格(100%回転)運転が要求されるので、軸受など各要素の高信頼性と長寿命化が要求されることは言うまでもない。

### 3.2 燃料電池への応用例

#### (1) 第1世代=PAFCの実証プラント

民間ベースでは、1983年に建設された東芝の50kWプラントがあるが、図8に示すように、小出力ながらも大小2台のターボチャージャ(小型車用と軽自動車用)を2段圧縮方式で応用した。

更に、1985年前後にムーンライト計画にてNEDOが高温高圧型と低温低圧型2種類の1000kW実証プラントを建設した。高圧型のタービン・圧縮機は中部電力知多発電所内に、50kWと同じくIHI製ターボチャージャ2台(サイズの異なるトラック用と漁船用)を高低圧2段に応用して設置された。<sup>(8)</sup>なお、このトラック用サイズのターボチャージャには、機械効率向上のためボールベアリングが採用された。

一方、低圧型は関西電力堺港発電所内に、島津製作所製のタービン圧縮機2台が、圧縮機2段(直列)、タービン単段(並列)の組合せで設置された。ここでは図9に示す様にジャーナル、スラスト軸受ともフォイル型空気軸受が採用された。<sup>(9)</sup>

更に、PAFCでは国内最大の11MW実証プラントが1991年に東京電力五井発電所内に設置され、タービン圧縮機として大型の軸流タービン式船用ターボチャージャ2台(2段)が採用された。

この様に、PAFCの実証試験はかなり広く行われてきたが、事業化するには建設コストやスペースの問題があり、今しばらくは時間を要する状況である。<sup>(10)</sup>

#### (2) 第2世代/第3世代の実証プラント

第2世代のMCFCは、PAFCの効率が40%前後であるのに対して、45~60%を目標に作動ガス温度が約700°Cで開発された。実証プラントはニューサンシャイン計画の前段階として、1991年100kWのパイロットプラントがMCFC研究組合赤城総合試験所に設置された。<sup>(11)</sup>このプラントには、中型トラックエンジン用のIHI製ターボチャージャが単段で採用された。空気供給圧力は0.22MPa{2.22kgf/cm<sup>2</sup>abs}であり、現状のターボチャージャの過給圧力範囲内にあるが、大出力化のためには高圧化が必要であった。

第2段階として、1993年末から1000kW実証プラント計画が中部電力川越発電所内で開始され、圧力比6のタービン・圧縮機が神戸製鋼所によって開発された。<sup>(12)</sup>図10に示すように、2段遠心圧縮機、2段軸流タービンから成り、ターボチャージャの応用と言うより本格的なガスタービンの構造である。

MCFCは米国においてもカリフォルニア州などで250kW級の実証試験が行われており、進捗度合も日本と大差ない様である。

なお、250kW級には圧力比3以上で大型トラック用

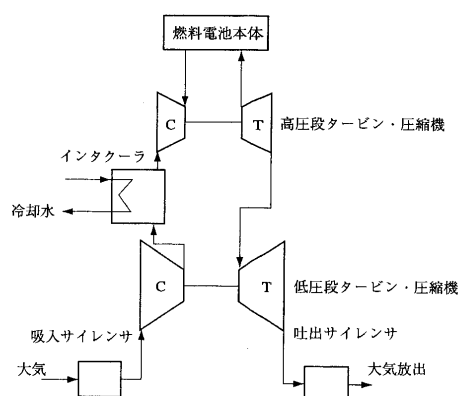


図8 2段2軸式燃料電池用タービン・圧縮機

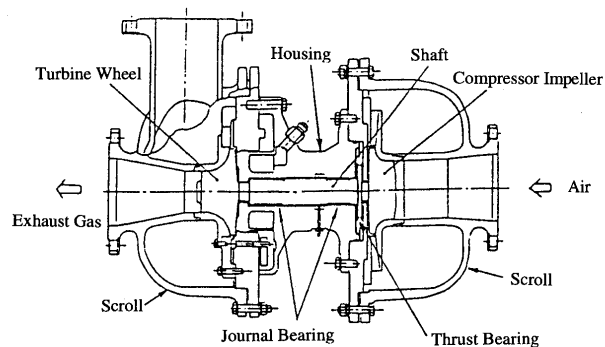


図9 空気軸受式タービン・圧縮機

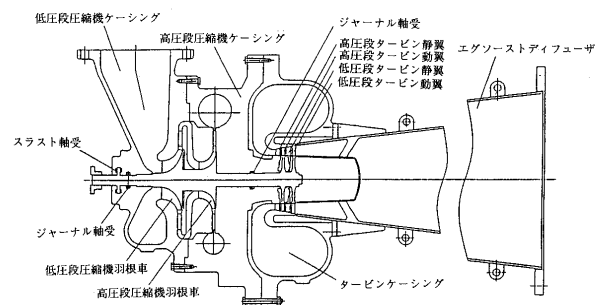


図10 MCFC 1000 kW 実証プラント用タービン・圧縮機

のターボチャージャが容量的に適合する。

一方、第3世代のSOFCもNEDOが進めており、民間でも電力会社を中心となって数十kW級の実証試験が行われている。効率はMCFCより更に高い60%程度を期待できることから、作動ガスは1000°Cと一層高くなり、排ガス利用のタービンが必要になるであろう。

### 4. 空気式冷凍サイクルへの応用

一般に、冷凍サイクルでは冷媒としてアンモニアやフロン(R134a)が用いられているが、直接冷却を行う食品冷凍庫などの特殊用途には、クリーンで取扱い易い空気冷媒が優れている場合がある。空気冷媒でも、図11に示す様に、-30°C以下になると冷凍機の成績係数(COP)はR134aに次第に近づいてくる。

図12,13に鹿島などが開発した空気式冷凍サイクルの

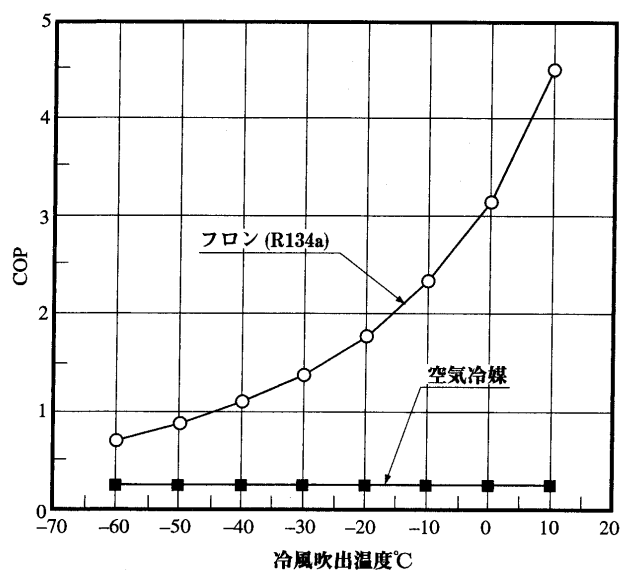


図11 冷媒(空気 vs フロン)による冷凍機の実績係数比較例

例を示す。図12では、ターボチャージャと同一軸に電動モータを設けている。<sup>(13)</sup>これに対して、図13は、ターボチャージャの前流側にブースタとしてインバータ駆動方式のメカニカルスーパーチャージャを設ける方式である。

いずれも、圧縮空気を熱交換器で冷却した後、タービンで膨張して冷却空気を作り出す原理は同じであるが、ターボチャージャと同軸回転する高速モータは発電機と同様、量産技術が未完成のため、ブースタ別置方式の方が簡便である。特に、ブースタとしてスーパーチャージャは消費動力性能も軸シールも自動車用で実績があり、本システムに適した装置であろう。一方、ターボチャージャは冷媒空気中に潤滑油の混入を避けるため空気軸受の採用が望まれる。タービン入口空気温度がかなり低いので翼車は低比速度となるが、軽量のアルミ合金で十分という利点がある。

空気冷媒式冷凍サイクルはターボチャージャの技術に応用できる新しい分野であり、今後の発展を注目してゆきたい。

## 5. 炭酸ガスレーザ用ガス循環ブロウ

小型ガスタービン、燃料電池、空気冷凍の3つが圧縮機、タービンの両方、即ち、ターボチャージャ全体の技術に応用するのに対して、小型圧縮機の技術に応用したものに炭酸ガスレーザ用循環ブロウがある。

従来、この種のブロウはルーツブロウが主流であったが、小型・軽量・高効率という利点で遠心圧縮機が注目された。

ターボチャージャのインペラを応用する際に考慮しなければならないことは、炭酸ガスとは言ってもヘリウムガスを多量に含み分子量が小さく、音速が大きい割には

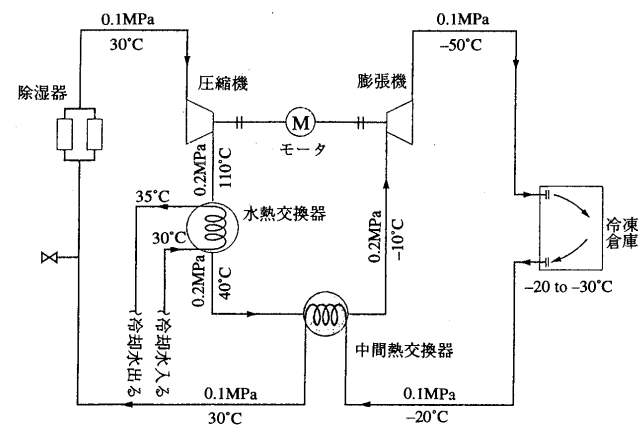


図12 モータ同軸ターボチャージャによる空気式冷凍サイクル

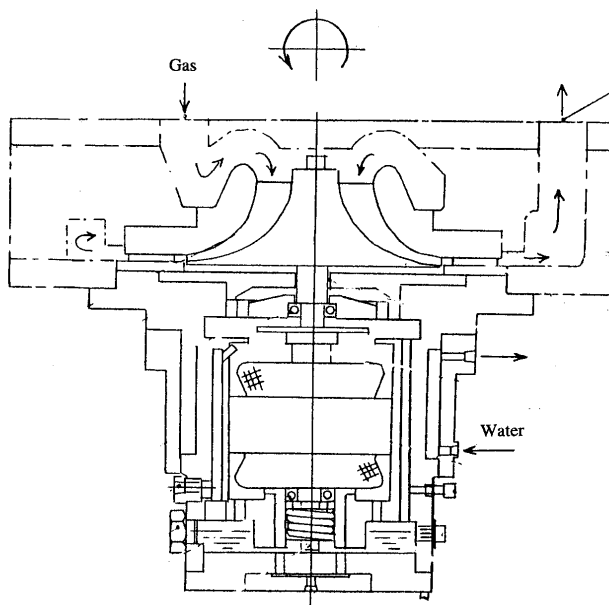
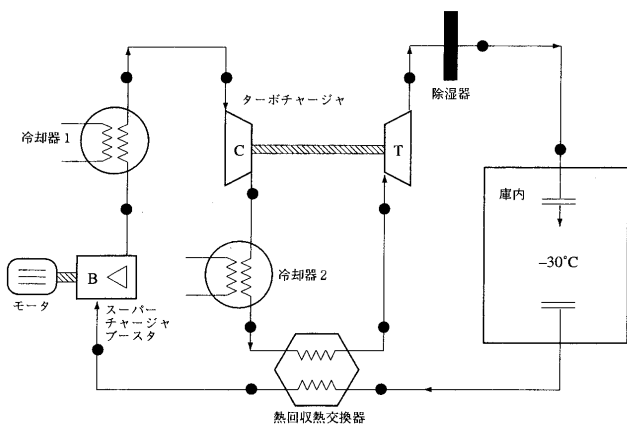
図14 CO<sub>2</sub>レーザガス循環ブロウ

図13 ブースタ別置空気式冷凍サイクル

駆動モータの回転数に制限があるため周速マッハ数が大きくとれず、かなり低比速度の圧縮機となり、高効率を保つ工夫が必要なことである。図 14 に IHI にて開発された縦型プロワの構造例を示す。<sup>(14)</sup>

## 6. 超小型ジェットエンジン

最後に「究極」の応用展開としてソフィアプレシジョン社の超小型ジェットエンジンを紹介する。<sup>(15)</sup>

ここまでの応用例が何らかの産業用、民生用での実用化を目指していたのに対し、このジェットエンジンは趣味の世界の模型飛行機用の原動機として、作動原理が本物と同じという点に特徴がある。

即ち、乗用車クラスに用いるターボチャージャの圧縮機とタービンを利用し、その排出ガスエネルギーを推力に変換している。カットモデルの写真を図 15 に示すが、これで推力 49 N {5 kgf} を発生する。更に、圧縮機、タービンの効率を上げることによって大きな推力を得られる。

この様に、模型とは言え、本物のジェットエンジンに極めて類似しているため、最近では教材用・実験用としての用途もある。これこそハイテクにして低コスト商品であるターボチャージャの特徴を最も効果的に応用した典型と言えよう。

## 7. まとめ

ターボチャージャの技術応用展開として、ガスタービン、燃料電池、冷凍機、プロワ、ミニジェットエンジンの 5 つの例について紹介した。

いずれも、プロト機あるいは実証試験の段階であり、量産機種として実用化されるには至っていない。しかし、ターボチャージャは、流体力学、高温材料、高速回転、生産技術などの殆どの機械工学分野の技術が集積された商品であるだけに、潜在的な可能性は極めて大きいことが判る。最近の低価格志向、汎用化の流れの中で、その可能性が開く時が来るかも知れない。

その様な期待の中で、21 世紀へ向けたターボチャージャの一層の技術革新と応用展開への努力を見守って行きたい。

## 参考文献

(1) Power-Gen Americas: Small Gas Turbines are... Turbomachinery International, Jan/Feb 1996

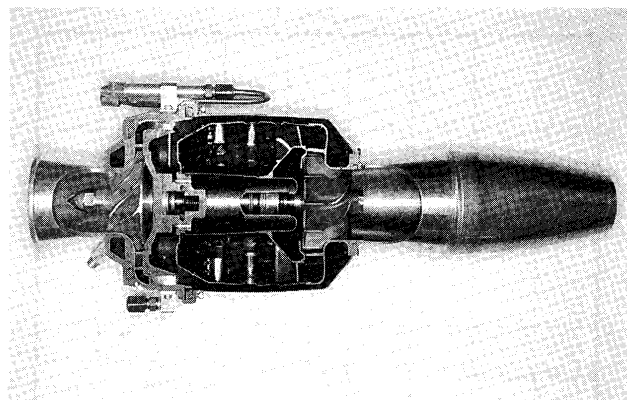


図 15 超小型ジェットエンジンのカットモデル

- (2) J. R. Arvin, et al, Design Features... of the Aerodyne Dalls Turbocharger, SAE 830013
- (3) 藤川, 携帯用ガスタービン発電機, GTSJ 誌, Vol. 23, No. 90 1995
- (4) Thomas Banker, Capstone Develops Local Power, Turbomachinery International, Jan/Feb 1996
- (5) D. R. Gallup, J. B. Kesseli, A Solarized Brayton Engine Based on Turbocharger Technology and the DLR Receiver, US DOE Report, 1994
- (6) Compact Cogenerators Could Do for the Power..., COMPRESSED AIR MAGAZINE, Sep. 1993
- (7) K. Fulton, Small radial designs promise low emissions and low costs, GAS TURBINE WORLD July-Aug. 1994
- (8) 矢崎, 燃料電池用タービン・圧縮機の開発, 石川島播磨技報, Vol. 26 No. 2 1986
- (9) 林, 三谷, ガス軸受を用いた 1000 kW 級燃料電池発電用タービン, コンプレッサの開発, 日本機械学会第 67 期通常総会講演会論文集 Vol. C 1990
- (10) 三巻, 浜松, 火力発電の効率向上: VI 将来技術, 電気評論 1993.11
- (11) 生越, 吉田, 望月ほか, 溶融炭酸塩型燃料電池システム制御試験設備による試験研究, 石川島播磨技報, Vol. 31, No. 6 1991
- (12) 加納, 新谷, 山口, 1000 kW 級パイロットプラント...排熱回収系, MCFC 研究組合第 25 回セミナー講演要旨集, 1995.2
- (13) 萩原, 空気で空気を冷やす, 日経メカニカル No. 467, 1995. 11.13
- (14) 清水, 久保, 野角, 炭酸ガスレーザ加工機用ガス循環ターボプロワの開発とシリーズ化, 第 34 回ターボ機械協会総会講演会論文集, 1995.5
- (15) 味岡, 超小型ジェットエンジン, 日経メカニカル No. 457, 1995.6.26

## 特集・ターボチャージャ

## セラミックターボチャージャローターの量産技術

槐島 弘志<sup>\*1</sup>,  
GEJIMA Hiroshi

吉田 真<sup>\*1</sup>  
YOSHIDA Makoto

## 1. まえがき

セラミックターボチャージャローターを搭載した乗用車が日本で本格的に生産開始された1985年以降、早くも12年が過ぎようとしている。窒化けい素セラミックスをエンジンまわりの高応力が発生する強度部材として使用する初めての例であり、多くの技術革新の集積として登場した部品であった。金属製ロータに比べ軽量で応答性の良いセラミックターボチャージャローターは、この間に多くの車種に採用されるようになり、現在、高級車用エンジンに装着されている。図1にセラミックターボチャージャローターの写真を示す。

このセラミックターボチャージャローターについては、従来より材料技術、プロセス技術、接合技術および信頼性技術等の面から、様々な技術論文<sup>(1),(2)</sup>が発表されている。ここでは、乗用車用ターボチャージャの厳しい要求を満足させるために進めてきた、量産技術の進歩に焦点を当てて解説する。

## 2. セラミックローターの量産化の課題

セラミックターボチャージャローターの量産には、2つの大きな課題があった。

第一は、脆性材料であるセラミックスを破壊することなく部品として用いるために必要な設計手法を確立することである。セラミックス材料の評価技術の開発、数値解析技術の開発、脆性材料の破壊理論の研究、使用環境の測定技術の開発など多岐にわたる開発をまとめ、かつ

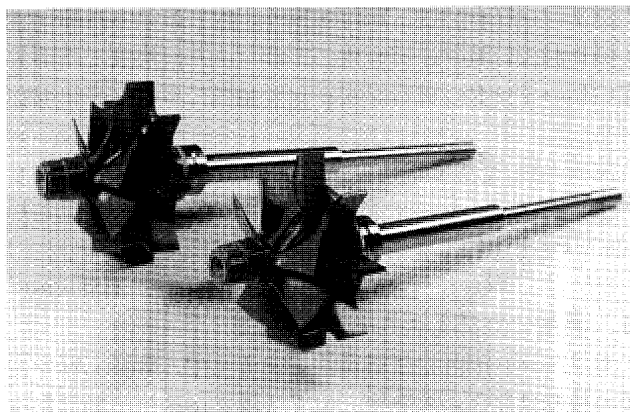


図1 セラミックターボチャージャローター

実際の部品を用いた様々な評価基準での破壊試験を実施することにより設計手法が確立された。加えて、セラミック材料の進歩により高い効率のローターの設計が可能になり、量産部品として認知されるに至った。例えば、開発の初期には十分な強度の材料が無く、高回転時の応力を低減させるため様々な形状変更が行われた。また、異物衝突時の破損を防止するため、一般的にはセラミックローターの翼は、金属製のものに比較し厚めに設計される。このような形状変更により、タービン効率が低下する傾向にあった。高いタービン効率を有する形状にセラミックローターを設計するためには、高応力環境下でも安全率を大きく取れるような高強度、高信頼性材料の開発が望まれてきた。新しい材料の出現により、設計の自由度が増し、高効率でかつ高信頼性の部品が作製できた訳である。

第二は、製造コストの低減である。セラミック部品を製造するためには、焼結という工程が入り、金属材料に比べ製造コストが高いとされている。また、窒化けい素は極めて研削加工に時間がかかる難削性材料であり、焼結後の加工費のコストウェイトが大きい。このため、製造コスト低減のためには、省力化した量産性の高い工程を選択し、焼結後の加工を最低限にまで減少させる必要があった。

## 3. 量産に対応した材料技術

種々の構造用セラミック材料の一般的な特性を表1<sup>(3)</sup>に示す。室温領域の強度と破壊靱性値ではジルコニアが、高温領域の強度では炭化けい素が他の材料と比較して優れていることがわかる。しかし、ジルコニアには高温領

表1 構造用セラミック材料の特性

|                                 | 窒化けい素 | 炭化けい素 | 部分安定化<br>ジルコニア | アルミナ |
|---------------------------------|-------|-------|----------------|------|
| かさ密度<br>(g/cm <sup>3</sup> )    | 3.2   | 3.0   | 6.0            | 3.9  |
| 曲げ強度 室温<br>(MPa)                | 676   | 490   | 895            | 360  |
| 1000°C                          | 598   | 490   | 329            | 288  |
| 1200°C                          | 392   | 490   | 167            | 242  |
| 破壊靱性<br>(MPa・m <sup>1/2</sup> ) | 6.1   | 2.4   | 6.7            | 4.2  |
| 耐熱衝撃性<br>(ΔT°C)                 | 680   | 460   | 320            | 260  |
| 熱伝導率<br>(W/mk)                  | 25    | 70    | 3              | 36   |

原稿受付 1997年1月20日

<sup>\*1</sup> 京セラ㈱ 〒899-43 鹿児島県国分市山下町1-4

表2 量産された自動車用セラミック部品

| 部品名称           | 材 料        | 自動車メーカー                                                | セラミックスメーカー                                        | 車載時期                                               | 目 的                            |
|----------------|------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| グロープラグ         | 窒化けい素      | いすゞ自動車<br>三菱自動車<br>日産自動車<br>トヨタ自動車                     | 京セラ<br>京セラ<br>日本特殊陶業<br>日本電装                      | 1981年<br>1983年<br>1985年<br>1992年                   | 始動性の改善                         |
| ホットプラグ         | 窒化けい素      | いすゞ自動車<br>トヨタ自動車<br>マツダ<br>三菱自動車                       | 京セラ<br>トヨタ自動車<br>日本ガイシ<br>京セラ                     | 1983年<br>1984年<br>1986年<br>1993年                   | 燃費・始動性の改善<br>出力の向上<br>エミッション低減 |
| ロッカアーム         | 窒化けい素      | 三菱自動車<br>日産自動車<br>日産自動車                                | 日本ガイシ<br>日本ガイシ<br>日本特殊陶業                          | 1984年<br>1987年<br>1988年                            | 耐摩擦・摩耗性向上                      |
| ポートライナー        | チタン酸アルミニウム | ボルシェ<br>ランボルギーニ                                        | ヘキスト<br>ヘキスト                                      | 1985年<br>1989年                                     | 断熱による効率向上                      |
| ターボチャージャローター   | 窒化けい素      | 日産自動車<br>日産自動車<br>いすゞ自動車<br>トヨタ自動車<br>トヨタ自動車<br>キャタピラー | 日本特殊陶業<br>日本ガイシ<br>京セラ<br>トヨタ自動車<br>京セラ<br>日本特殊陶業 | 1985年<br>1985年<br>1988年<br>1989年<br>1990年<br>1992年 | ターボラグの解消                       |
| 燃料インジェクタロングリンク | 窒化けい素      | カミンズ                                                   | 東芝                                                | 1989年                                              | 耐摩耗性向上                         |
| カムローラー         | 窒化けい素      | デトロイト<br>ディーゼル                                         | 京セラ                                               | 1992年                                              | 耐摩擦・摩耗性向上                      |
| タペット           | 窒化けい素      | 日産ディーゼル                                                | 日本特殊陶業                                            | 1993年                                              | 耐摩擦・摩耗性向上                      |
| 排気制御弁          | 窒化けい素      | トヨタ自動車                                                 | 京セラ                                               | 1993年                                              | シール性向上<br>軽量化・低コスト化            |

域での極端な強度の低下、炭化けい素には低い破壊靱性値という欠点があり、比較的バランスの良い窒化けい素材料がエンジン部品として用いられることとなった。表2に、今までに実用化された自動車用セラミック部品の一覧を示す。ほとんどの部品に窒化けい素セラミックスが用いられており、その優れた特性が部品として実証されていることがわかる。

ただし、ターボチャージャローターの開発時点に使用され始めていた窒化けい素材料では、室温・高温ともに強度が低いレベルであり、高回転で使用される部品には適応できないものであった。このため、高強度化に向けての研究開発が活発に行われ、ここ20年で窒化けい素材料の飛躍的な強度向上を実現した。高強度、高信頼性材料を開発するために、数多くの手法が取られてきたが、焼結助剤の選定及び窒化けい素原料の最適化がこれらの開発のポイントとなった。図2に京セラにおける高強度窒化けい素材料の開発経過を示す。

量産に当たって材料面で留意した点は、強度特性の安定化である。数多くの部品を間断無く生産する際に、焼結不良などを起こしては、大きな不良率を計上してしまい、かつ大きな損失となる。このため焼結時の最適焼結温度の広い組成を決定し、比較的広い温度範囲で焼結体組織の変化が少なく、結果として安定した高強度を維持できることを確認した。これにより、大型の焼成炉内の有効ゾーンを広く使用することができ、焼成コストの低減につなげることができた。また、原料調製の作業室

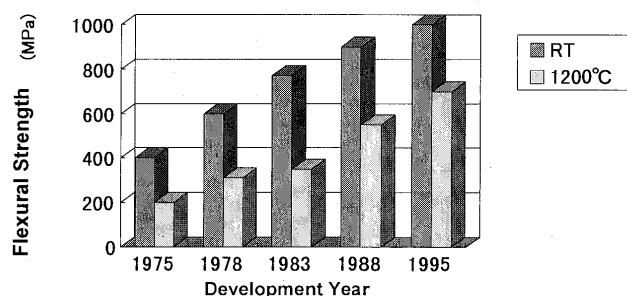


図2 京セラにおける高強度窒化けい素材料の開発経過

のクリーン度を上げ、粉体を扱う工程における外部からの異物混入の減少に努めた。これにより、均質で内部欠陥の極めて少ない材料を安定して量産できる開発に成功した。

開発当初、室温4点曲げ強度が500 MPa程度だったものが、ターボチャージャローター用材料では、安定して900 MPaを上回るまでに向上させることができた。

#### 4. 量産に対応した製造工程技術

セラミック部品の価格を決定する上で、製造工程の占める役割は非常に大きい。セラミック部品は高価であるという印象を一般に与えてしまったのは、量産工程が確立していない少量試作部品の価格が非常に高いためであり、普及促進にブレーキをかけてしまった。しかし、現在では量産効果の大きい製造工程を構築することにより、



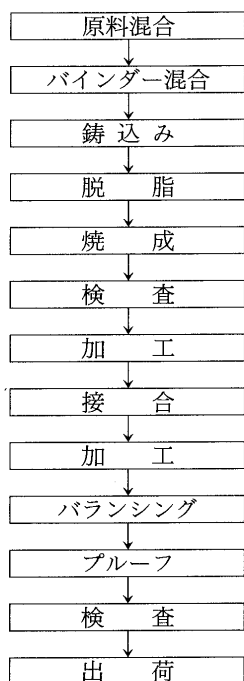


図3 セラミックターボチャージャーローターの製造工程

量産部品の価格低減に努力を続けており、開発当初から比べると大きな進歩が認められる。

図3にセラミックターボチャージャーローターの製造工程を示す。量産に対応するため、原料混合、有機バインダーとの混合、鑄込み（成形）、脱脂、焼成、検査、加工、接合など、各工程毎に様々な開発がなされた。以下に代表的な事例を示す。

#### 4.1 成形技術

最も部品価格、品質に影響を及ぼす工程が成形である。研削工程も高価なダイヤモンドホイールを用いて、長時間研磨すると多大な費用が発生する。しかし、完成品に極めて近い成形体形状を得ることができると、研削部位

を減らすことが可能になり、研削工程の費用は幾何級数的に減少する。また、試作時に不良品比率が高いのも成形であり、不良品を削減することにより高価な原料粉末の使用量が削減できる。故に、成形技術の進歩が、セラミックターボチャージャーローターの量産化に大きな貢献をしたと行っても過言ではない。

セラミックの成形方法を大別し、表3<sup>(3)</sup>に示す。大きく加圧成形、可塑成形および鑄込み成形に分類される。この中でターボチャージャーローターのように三次元複雑形状の成形に用いられるのは、鑄込み成形に分類される固形鑄込み成形と可塑成形に分類される射出成形である。

固形鑄込み成形には、①脱脂時間が短い、②大型の製品が成形できるという長所と、①成形時間が長い、②石膏など多孔質材料を型として使用するため、形状精度および表面粗さが悪いという短所がある。一方、射出成形には、①成形時間が短い、②表面粗さおよび形状精度が良いという長所と、①成形圧が高く型の摩耗が早い、②脱脂時間が長い、③大型の製品ができないという短所があり、ターボチャージャーローターの量産に採用するにはいずれの方法にも大きな課題が残ることになる。

そこで、両成形技術の良い点をまとめ上げ、新しい固化方法を用いた鑄込み成形法を開発した。この方法は、①成形時間が短い、②成形圧が低い、③表面粗さ、形状精度が良い、④脱脂時間が短い、⑤大きな製品でも成形できるという特徴を持ち、ターボチャージャーローターの量産に適した成形法である。この成形法の完成により、高い形状精度で、かつ極めて低い不良発生率での生産が可能になり、加工工程の省力化が推進できた。

この成形手法は、小型のターボチャージャーローターの量産に使われているのに加えて、大型のガスタービンローターの試作にも適用できるようになった<sup>(4)</sup>。現在では、最大翼外径が200 mmを超える大型軸流ローターの成形条件まで、決定することができた。

表3 セラミックス成形法の分類と比較

| 様式    | 成形方法     | 製品形状           | 長所                           | 短所                            |
|-------|----------|----------------|------------------------------|-------------------------------|
| 加圧成形  | 乾式加圧     | 小型<br>単純～やや複雑  | 成形時間が短い<br>自動化・連続化<br>量産性が高い | 形状に制限有り<br>密度不均一<br>大型製品に不向き  |
|       | CIP      | 小型～大型<br>単純    | 密度均一<br>切削加工が可能<br>大型製品可能    | 形状に制限有り<br>量産性が低い<br>原料使用量が多い |
| 可塑成形  | 押出し      | 小型<br>棒状・パイプ状  | 自動化・連続化<br>量産性が高い            | 形状に制限有り<br>収縮の縦横差             |
|       | 射出       | 小型<br>単純～複雑    | 自動化・連続化<br>量産性が高い<br>複雑部品可能  | 小型部品に限定<br>金型が高価              |
| 鑄込み成形 | 固形鑄込み    | 小型～大型<br>単純～複雑 | 形状制約少ない<br>設備が安価<br>大型製品可能   | 寸法精度が悪い<br>量産性が低い             |
|       | ドクターブレード | 小型<br>シート状     | 量産性が高い<br>自動化・連続化<br>表面平滑性良好 | 形状に制限有り<br>設備が大型・高価           |

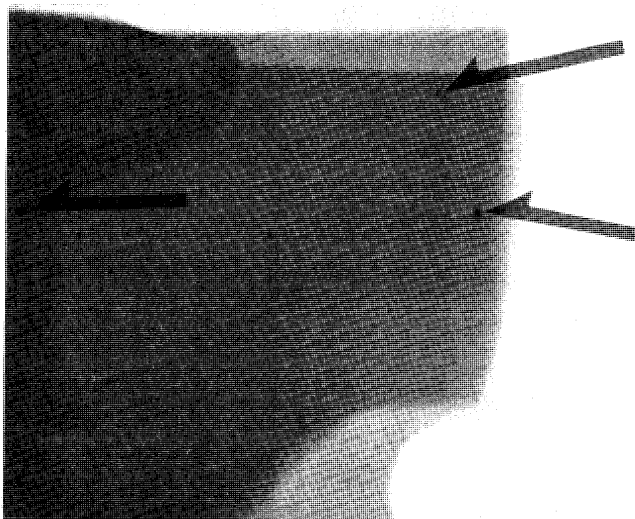


図4 透過型 X 線非破壊検査の画像出力例

#### 4.2 検査方法

セラミックスは、脆性材料であるため、一般に行われている外観検査、蛍光探傷検査の他に、内部欠陥を検査する必要がある。

内部欠陥の探傷方法は、X 線探傷と超音波探傷が一般的である。ターボチャージャローターの翼部のように複雑形状の製品は、超音波探傷では超音波が乱反射してしまい検査ができない。一方、セラミックスと金属シャフトとの接合部のような単純形状部位は、超音波探傷検査が適用できる。

量産にあたって、内部欠陥の検出能力を高めるため、マイクロフォーカス X 線装置を導入した。この装置により、拡大しての非破壊検査が可能になり、最も X 線が透過しにくいハブ部でも約 0.1 mm の欠陥まで検出が可能になった。また加えて、製品の搬入搬出の自動化、および検査画面をレーザービデオディスクに記憶させることで合理化が可能となり、フィルムによる検査に比較して、時間当たりの検査処理数が 4 倍となった。画像出力の例を図 4 に示す。

#### 4.3 バランス

セラミックターボチャージャローターは、高回転で使用されるため、高精度のバランス修正が必要となる。バランス修正の方法には、回転軸に対しての重量分布不均一を是正するために重りを付加する方法と、除去加工する方法とがある。一般的にターボチャージャローターのように高回転で使用されるものに対しては、重りが飛散する可能性があるため、除去加工を行う方法が採られている。

セラミックスは、焼結時に収縮を伴う変形を生じる。このため、焼結による変形が各製品間で差のある場合には、バラシングエリアを大きく取り、バランス修正時に除去できる容積を大きく取っておく必要がある。しかし、このことは、除去加工時間を増大させ生産性を低下させるとともに、軽量化、低慣性力を図る目的からも設

計上適切ではない。

そこで、焼結時の変形を研削加工の際に吸収することを目的として、回転軸に対して重量分布が均一となるように加工基準を決める方法が取られる。つまり、加工時の中心軸を、質量中心に持っていき、加工後のアンバランスの発生を押さえることがポイントとなる。試作部品を製作していた際には、バランス測定のための前加工、バランス測定、センター穴移動そして本加工と 4 段階の研削加工工程を採っていた。しかし、ターボチャージャローターの量産に際しては、成形工程に 4.1 項で述べた新開発の成形方法を採用した結果、成形体の形状精度が向上し、これに伴い焼結体の精度が大幅に向上した。さらに、焼結による各製品間での変形の差が減少した。これらの精度向上により、従来のような加工前のバランス測定の必要がなくなり、ハブの幾何学的中心で加工することで、わずかなアンバランス量以内に制御することが可能となった。このハブの幾何学中心に加工基準を自動的に割り出すために、レーザ距離計を用いてハブ中心を計算し、基準を加工する専用の自動加工機を開発し、量産ラインに採用した。

#### 4.4 研削加工

高強度窒化けい素材料は、一旦焼結してしまうと旋盤などによる切削加工ができないため、形状加工にはダイヤモンドホイールを用いた湿式研削加工が行われる。また、セラミックスの中でも難加工材料に属するため、加工機にも、剛性の高い機械が必要となる。

現在の加工には、砥石径  $\phi 500$  mm、周速 270 m/sec、砥石軸モータ出力 5.5 kW クラスの CNC 円筒研削盤をフリーフローコンベアで連結して自動稼働させている。

一般に、量産時の研削加工において 2 つの考え方がある。一方は、砥石の脱着を容易にすることで作業者の負担を軽くする小径砥石の利用という考え方であり、他方は、大径の砥石を用い 1 回の砥石交換で多くの製品を削るという省段取り回数という考え方である。セラミックターボチャージャローターの量産においては、砥石の加工面粗さの砥石によるばらつきをできるだけ押さえるために、大径の砥石を用いる工法を採用した。砥石交換作業時の作業者への負担軽減については、各機械毎に砥石交換用のジブクレーンをつける方式を採った。

セラミックターボチャージャローターの加工において、高い加工形状精度を要求されることは言うまでもないが、特に、金属との接合を行うボス部の加工に関しては、注意を要する。セラミックスへの加工ダメージ、つまりマイクロクラックを押さえる必要がある反面、接合強度を維持するためにある程度の表面粗さは必要である。これらの加工面に必要とされる特性と生産性とは相反する課題であった。しかし、加工条件、砥石の粒度および組成を変えて研削加工を実施し、接合部の高温抜け試験、室温曲げ試験を繰り返す行うことで、双方の課題が両立する条件をそれぞれについて選定することができた。

## 5. まとめ

セラミック部品への価格低減の要求は年々厳しくなり、セラミックターボチャージャローターについても、この例外ではない。本文で述べてきた省力化にポイントを置いた量産技術の開発に止まらず、根本的な低価格材料開発、新規製造プロセス技術開発に対する努力が継続して続けられている。このような努力が、高信頼性でかつ低価格のセラミック部品を生み出し、必ず市場拡大に繋がるものと信じている。また、セラミックローターの量産を開始して以来、自動車用セラミック部品の量産技術は着実に進歩しており、セラミック材料を様々なニーズに対応させることが可能になっている。セラミックターボチャージャローターの量産技術開発で得られた成果は、他のセラミック部品量産技術へ確実に適用されており、部品価格の低減に大きな効果を上げている。

さらに、セラミックターボチャージャローターの量産化により、脆性材料であるセラミックスを構造部材として設計する手法が確立し、セラミックスの特性を生かす設計技術の重要性への認識が生まれた。このことから、現在でもセラミック部品の信頼性を向上させるための設計技術開発・評価技術開発に努力がはらわれている。このような地道な努力が、セラミックスを金属、プラスチックに次ぐ第三の構造材料に育てると信じるものである。

## 参考文献

- (1) Yoshida, M., Kokaji, A., Koga, K., SAE Paper, No. 890424 (1989)
- (2) Katayama, K., et al., SAE Paper, No. 861128 (1986)
- (3) 吉田真, 新素材, 1993, 9 (1993-9), p. 51
- (4) Yoshida, M., et al., ASME Paper, No. 94-GT-332

## 特集・ターボチャージャ

## ターボチャージャの生産動向

秋田 隆\*1

AKITA Takashi

## 1. はじめに

ターボチャージャは1910年頃にアルフレッドビュッヒが過給の実験を試み、その後スイスBBC社が1924年に最初のターボチャージャを製作して以来、70年以上にわたり改良が加えられ現在では往復動機関の出力向上・効率改善になくてはならない補機となっている。わが国でも船用を中心に生産が開始され、造船業の発展にともない急激に生産量を増加させてきた。その後1980年代に自動車用ターボチャージャが本格的に生産が開始され生産台数は一気に増加した。

日本ガスタービン学会でターボチャージャの生産実績の収集をはじめたのは1984年からであるが、収集された生産実績および技術仕様はガスタービン・ターボチャージャ関係者に有意義なデータを提供してきたと考えている。

## 2. ターボチャージャの生産実績の推移

表1は1991年以降の生産実績を圧縮機翼車外径を100mm毎に区分して暦年順に示したものである。クラス1は翼車径100mm以下のもの、クラス2は翼車径100mmを超え200以下のもの以降クラス10の1000mmまで区分しデータを整理してある。生産数は一部未収集な年があり完全なものではない。またクラス1のデータは1000台未満を四捨五入した概数で示してある。

これらの生産実績を見やすくするため、クラス1とクラス2を図1に、クラス3以上を図2に、生産された過

給機種数の歴年毎推移を図3に示す。クラス1のターボチャージャは主として自動車（乗用車、トラック等）に使用されており1991年以降170万台前後が生産され、1995年には190万台を超える生産実績を記録している。クラス2は小型船舶の主機関用および産業用に使用される。1992年を除き約10,000台のペースで生産されているが、近年機種の減少が目立っている。

クラス3以上のターボチャージャは主として船用主・補機および発電プラント用ディーゼル機関に使用される。特にクラス6以上はほとんど船用主機関用に用いられており新造船建造量の推移に大きく依存している。これらの中大型ターボチャージャは通常等比級数で比例設計されるため機種の存在しないクラスもある。これらのターボチャージャの生産実績は徐々に減少する傾向を示しているが、1994年および1995年の生産数に一部未収集のものがあるため実態より大きな減少傾向を示していることをお断りしておく。

## 3. 1991年以降の技術動向

各クラスのターボチャージャにおける最新の技術動向については各々の専門家による解説を参照願うこととし、本稿では生産実績の背景にある技術的な要因について若干記述することとしたい。

大型ターボチャージャにおいてはディーゼル機関の高効率化と高出力化に対応しさまざまな機種が生産された。機関の高効率化のためにはターボチャージャの総合効率

表1 過給機翼車外径別生産実績

|                      | Class of Compressor Wheel Diameter (mm) |        |           |        |           |        |           |        |           |        |           |        |           |        |
|----------------------|-----------------------------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|                      | Class 1                                 |        | Class 2   |        | Class 3   |        | Class 4   |        | Class 5   |        | Class 6   |        | Class 7   |        |
|                      | 0~100mm                                 |        | 101~200mm |        | 201~300mm |        | 301~400mm |        | 401~500mm |        | 501~600mm |        | 601~700mm |        |
| Year                 | Units                                   | Models | Units     | Models | Units     | Models | Units     | Models | Units     | Models | Units     | Models | Units     | Models |
| 1991                 | 1,742,000                               | 55     | 11,074    | 26     | 977       | 12     | 393       | 9      | 83        | 5      | 147       | 8      | 183       | 5      |
| 1992                 | 1,720,000                               | 75     | 19,010    | 26     | 921       | 15     | 363       | 11     | 118       | 5      | 154       | 8      | 162       | 6      |
| 1993                 | 1,636,000                               | 68     | 11,526    | 27     | 915       | 16     | 306       | 12     | 130       | 8      | 185       | 8      | 161       | 7      |
| 1994                 | 1,743,000                               | 61     | 12,158    | 21     | 877       | 14     | 260       | 7      | 98        | 2      | 128       | 5      | 136       | 6      |
| 1995                 | 1,934,000                               | 64     | 9,883     | 21     | 722       | 13     | 287       | 9      | 73        | 1      | 110       | 8      | 111       | 5      |
| '91~'95<br>Sub Total | 8,775,000                               |        | 63,651    |        | 4,412     |        | 1,609     |        | 502       |        | 724       |        | 753       |        |

原稿受付 1997年2月13日

\* 1 石川島播磨重工業㈱

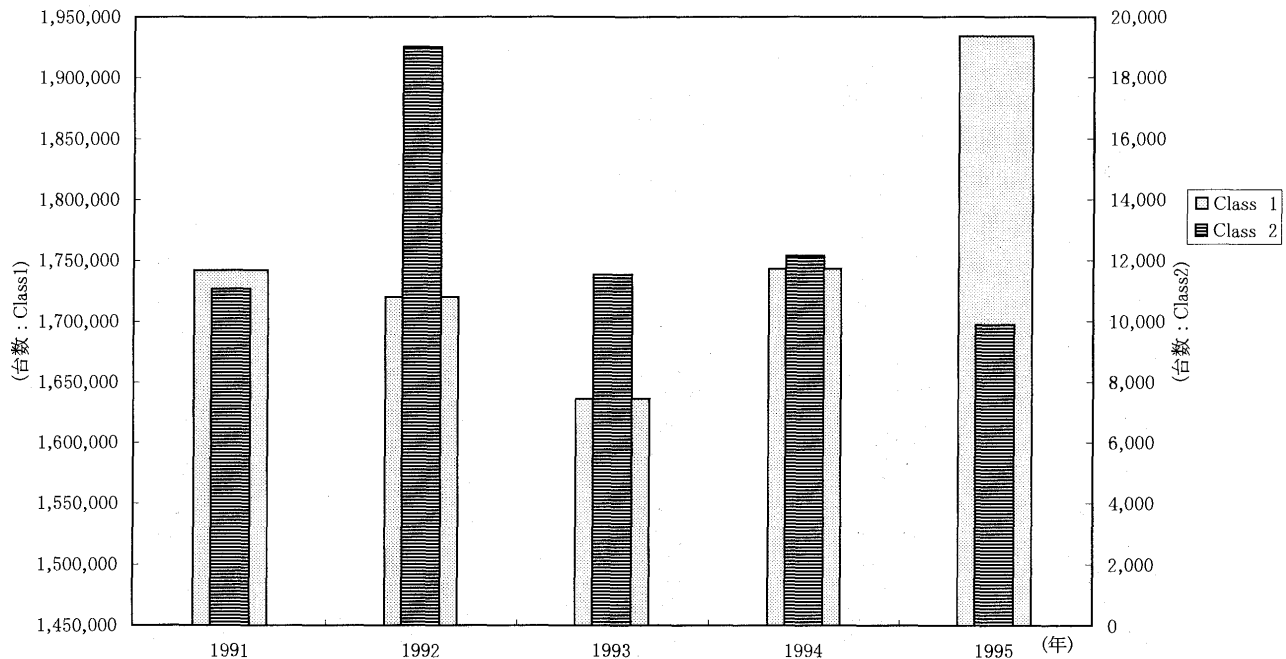


図1 過給機生産実績の推移—台数 その1 (Class 1, 2)

に対する要求が高まり各社とも1990年頃から高効率型の機種を生産し、クラス6以上の大型機においてはターボチャージャ単体で70%以上の総合効率を実現した。これには流体性能解析のためのCFDの進歩と同時にFEMによる構造解析や多軸同時制御のNC工作機械による生産技術の進歩が大きく寄与している。船用ディーゼル機関においては低負荷域でのシリンダ掃気のための圧力差が小さく空気量が少ないため、コンプレッサ特性上低圧力比域で十分なサージ安定性を確保することが難しい特徴がある。したがってこれらの高効率型ターボチャージャの多くは30度以上のバックワード角を持ったラジアルコンプレッサを使い船用機関特有の比較的傾いた作動線においても低圧力比域で十分なサージ安定性を確保する一方、各運転条件で高いコンプレッサ効率が

得られる設計となっている。またターボチャージャの効率が機関の要求値を越える場合は、余剰の排ガスエネルギーをパワータービンで回収し機関出力軸に還元するターボコンパウンド機関が成立し、排ガスエコノマイザを含めたプラントの全体効率を向上させることができる。1991年から1993年にかけこれらの機関が生産されている。

一方、ディーゼル機関の高出力化の要求は1991年以降急速に高まり、これにたいしては高圧力比に対応したコンプレッサが開発された。高圧力比用コンプレッサはバックワード角を減少させた翼形状を用い、同一周速でさらに高い吐出圧力を得るとともに翼車内での温度上昇をおさえ従来使用してきた耐熱アルミ材の使用を可能としている。またバックワード角を減少させた翼形状は遠心応力を減少させより高い周速での運転を可能にする効果もある。コンプレッサ特性としては、前述のように高い圧力比と船用機関に合ったサージ特性の両立のため様々な研究がなされコンプレッサ圧力比4以上での使用が実用化されている。またさらに高い圧力比に対応するため、ステンレス材を使用したインペラあるいは背面を空気冷却したインペラなどが試験されている。

クラス3,4の中型ターボチャージャでは生産台数の割にモデル数が多いことが特徴と言えよう。これは従来からあるアクシャルタービンを使用したターボチャージャと近年増加傾向にあるラジアルタービンを使用したターボチャージャが依然並行して生産されているためであるが、徐々にラジアルタービンを使用したターボチャージャが主力になってきている。理由はラジアルタービンの使用により構造が単純になりコストメリットがあるこ

| Class 8   |        | Class 9   |        | Class 10   |        | Total      |        |
|-----------|--------|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|
| 701~800mm |        | 801~900mm |        | 901~1000mm |        | (Class 2~) |        |
| Units     | Models | Units     | Models | Units      | Models | Units      | Models |
| 0         | 0      | 89        | 6      | 0          | 0      | 12,946     | 71     |
| 0         | 0      | 98        | 5      | 0          | 0      | 20,826     | 76     |
| 0         | 0      | 86        | 4      | 0          | 0      | 13,309     | 82     |
| 0         | 0      | 34        | 3      | 0          | 0      | 13,691     | 58     |
| 0         | 0      | 78        | 3      | 0          | 0      | 11,264     | 60     |
| 0         |        | 385       |        | 0          |        | 72,036     |        |

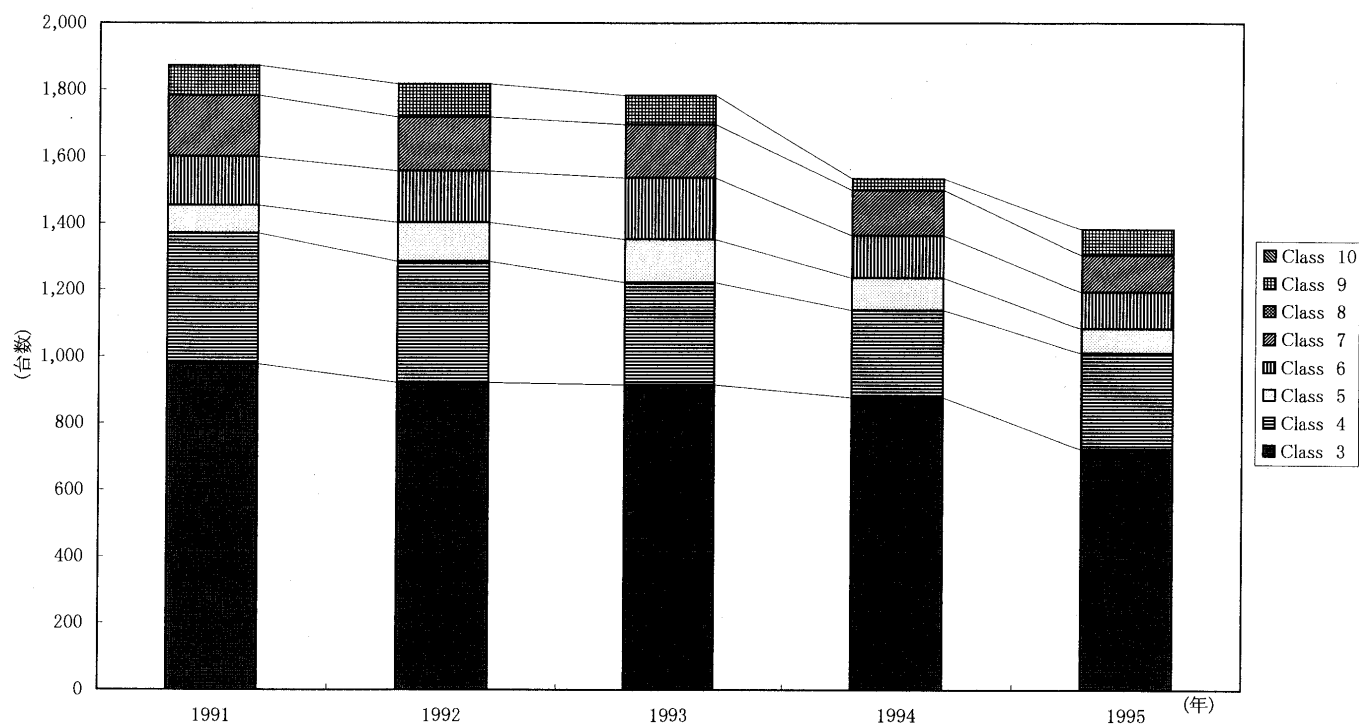


図2 過給機生産実績の推移—台数 その2 (Class 3～)

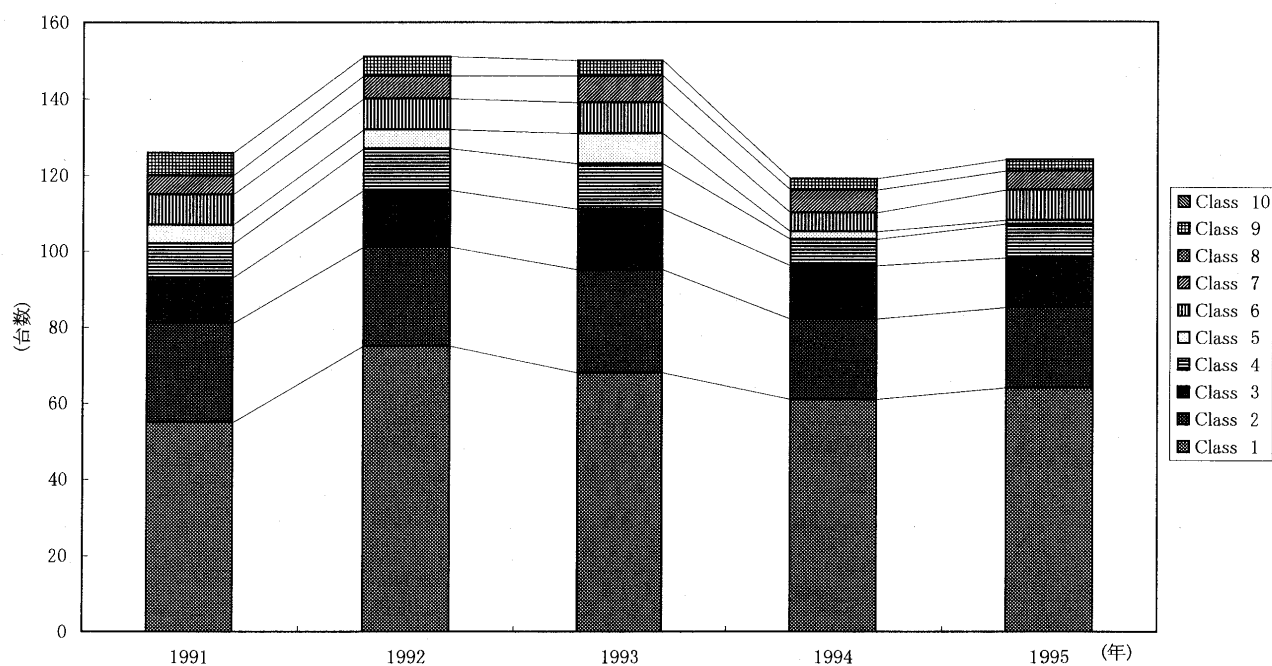


図3 過給機種数の推移—型式数

と、またラジアルタービンの構造上容易にケーシングを無冷却化することが可能になり燃料に含まれる硫黄分による露点腐食を避けることが出来ることが大きな要因である。また3次元翼の適用によりアクシャルタービンと比較しタービン効率の改善が進み、精密鑄造技術の進歩に助けられより大型のラジアルタービン付きターボチャージャが出現している。ラジアルタービンの形態は

ノズル付き純ラジアル型、ノズル付き斜流型、ノズルレスのツインフロー斜流型など様々なものが用いられているのも興味深い。

クラス2のターボチャージャは主に小型船舶用、産業用に用いられているが、このクラスのターボチャージャはほとんどがクラス1と同じくノズルレスのタービンにより排気パルスを有効利用し、船舶の加速性あるいは発

電機の負荷投入特性に寄与している。また漁船用としては種々の用途に使用できるようにコンプレッサもベンレスディフューザを採用し作動範囲を広くしてトルクリッチ運転に対応するケースが多い。

クラス1は主に自動車用であるが、大きく分けると乗用車用と大型ディーゼルトラック用の2種類がある。構造としては乗用車用はベンレスディフューザのコンプレッサ、ノズルレスタービンとウエストゲート弁の組み合わせであるが、セラミックスのタービン翼車、合成樹脂のコンプレッサインペラ、アブレードプルケージング、転がり軸受の採用などバラエティーに富んだ設計がおこなわれている。これらは排ガス規制への対応、低燃費、小型軽量化、快適な操縦感覚など様々な要求に対応すべく開発・改良がおこなわれた結果である。ディーゼルトラック用過給機は機関性能改善のため、可変容量タービンを装備したターボチャージャが多く採用されている。可変機構としてはノズル翼の角度やノズル幅の制御など種々の方式が採用されている。生産台数は170万台前後であるが1995年は190万台以上を記録した。この伸びの原因は明らかではないが、軽自動車へのターボチャージャの普及や海外へのエンジンのOEM供給等の要因が考えられる。

#### 4. おわりに

以上筆者が思い付くままに過去5年間のターボチャージャの生産動向・技術動向について記したが、内容の不備についてはご容赦願いたい。またデータの不十分な点に関しては今後追加修正していく予定である。ターボチャージャは各々の用途・分野に特化した開発がおこなわれ、環境問題やエネルギー問題の解決にそれぞれ大きく貢献しており、今後とも各メーカーの努力により性能・機能が発展することは疑いの余地がないと思われる。

#### 参考文献

- (1) H. Ammann, K. Watanuki, M. Nakamura, H. Satoh Energy saving with high efficiency IHI-BBC VTR.. 4E turbocharger MESJ 1990
- (2) K. Imakiire, M. Kimura, E. Matsuo Development of MET-SR-VG Turbocharger Driven by Radial-Flow Turbine with Variable Geometry Nozzle MESJ 1990
- (3) K. Watanuki, M. Nakamura, Y. Wakai Developments & Application of Middle-Size Turbochargers, RH-3 Series, for Marine Engines MESJ 1990
- (4) K. H. Rone, H. Hinden, J. Baets, M. Banzhaf VTR/C.. 4P A Turbocharger with High Pressure Ratio for Highly Supercharged 4-Stroke Diesel Engines CIMAC 1991
- (5) M. Appel Investigations into and Operational Results using Radial-Flow Turbochargers and Power Turbines CIMAC 1991
- (6) K. Imakiire, M. Kimura Future Development of High Pressure Ratio Turbocharger CIMAC 1993
- (7) M. Matsudaira, T. Mikogami, M. Muroi Development of High Efficiency Turbochargers for High Speed Marine Diesel Engines CIMAC 1995
- (8) K. Imakiire, M. Kimura, K. Shiraishi, E. Matsuo MET-SH Turbocharger featuring Steel Compressor Impeller for Highly Rated Diesel Engine CIMAC 1995
- (9) G. Wachtmeister, K. H. Schrott Design Features and Test Results of Cost-Saving High-Performance Radial Turbochargers CIMAC 1995
- (10) U. Gribi, P. Elvekjaer, K. Mooser New Series of Small ABB Turbochargers for High Pressure Ratios CIMAC 1995
- (11) 国産ガスタービン・過給機生産実績資料集〔1994年版〕, (1994. 12), 日本ガスタービン学会
- (12) 「1994年ガスタービン及び過給機生産統計」日本ガスタービン学会誌 (VOL. 23 NO. 89 JUN. 1995)
- (13) 「1995年ガスタービン及び過給機生産統計」日本ガスタービン学会誌 (VOL. 24 NO. 93 JUN. 1996)

# 携帯用ガスタービン発電機の熱交換器開発

## The Development of the Recuperator for the Micro Gas Turbine Generator

飯尾 雅俊<sup>\*1</sup>, 高村 東作<sup>\*1</sup>  
 IIO Masatoshi TAKAMURA Tohsaku

### 1. はじめに

自動車用ガスタービン及びターボチャージャの技術を活用し、携帯用ガスタービン発電機、商品名 Dynajet 2.6 (型式 NMGT: Nissann Micro Gas Turbine Generator) を開発した。

夜間の工事現場あるいは、災害現場等にて発電機を用いる場合、信頼性が高く、運搬しやすく、しかも低騒音な発電機が求められる。しかしながら、現在一般に用いられているレシプロエンジンを用いた発電機では、2~3 kW の発電機であっても、2, 3 人の人手では持ち運べないほど大きく、重い。それに対しガスタービンは、小型で高出力を得られる特長生かし、これに直結した高速発電機を組み合わせることにより、小型・軽量の発電機が実現できる。さらに、排熱を有効利用することにより、例えば、排気の熱を外部に設けた熱交換器により回収することで、温風を出しながら電力も利用できるヒータや、温水を沸かして利用できる温水シャワーといった、これまでのレシプロエンジンを用いた発電機には無かった用途を、生み出す可能性があると考え、ガスタービンを用いた発電機の開発を行った。

ここでは、本発電機の概要を述べると共に、これの主要部品であり、従来品に対して大幅に軽量化を実現した熱交換器について述べる。

### 2. 本発電機の概要

本発電機の外観を写真 1 に、諸元及び特性を表 1 に示す。表 1 にある諸元は、基本仕様である NMGT-2.6 X と、低温始動性を向上させた仕様の NMGT-2.6 DX の 2 つのモデルについて示してある。

本発電機は、1 軸再生式ガスタービンエンジンと、これに直結した高速発電機を用いている。このエンジンの概略を、図 1 に示す。

タービンロータと圧縮機インペラを背面合わせとし、同軸上に発電機を取り付けることにより、シンプルな構

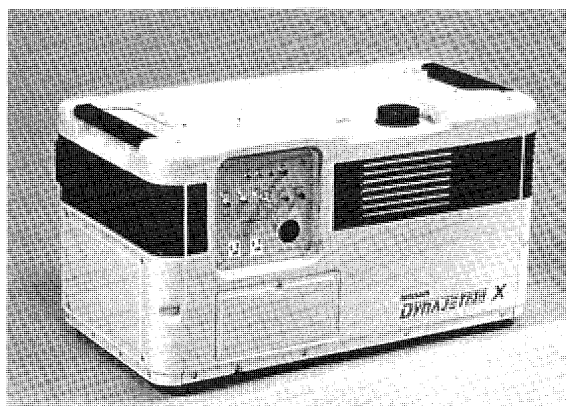


写真 1 Dynajet 2.6 の外観

表 1 Dynajet 2.6 の諸元及び特性

| 型式         | NMGT-2.6 X                | NMGT-2.6 DX       |
|------------|---------------------------|-------------------|
| エンジン       | 一軸再生式ガスタービン               |                   |
| 発電機形式      | 永久磁石式同期型                  |                   |
| 定格回転数      | 100,000rpm                |                   |
| 定格電圧       | 100 V                     | 110 V             |
| 定格出力       | 2.6 k V A                 |                   |
| 周波数        | 50/60 H z 両用              |                   |
| 使用燃料       | 灯油もしくは軽油                  |                   |
| 燃料消費率      | 定格出力で 4.5 リットル/時間以下       |                   |
| 使用温度条件     | - 5 ~ + 3 0 ℃             | - 2 5 ~ + 5 0 ℃   |
| 騒音レベル      | 機側 7 m 位置で 5 5 d B (A) 以下 |                   |
| 寸法 (長×幅×高) | 782mm×424mm×440mm         | 815mm×424mm×440mm |
| 乾燥重量       | 62kg                      | 65kg              |

原稿受付 1996 年 11 月 11 日

\* 1 日産自動車㈱ 〒237 横須賀市夏島町 1



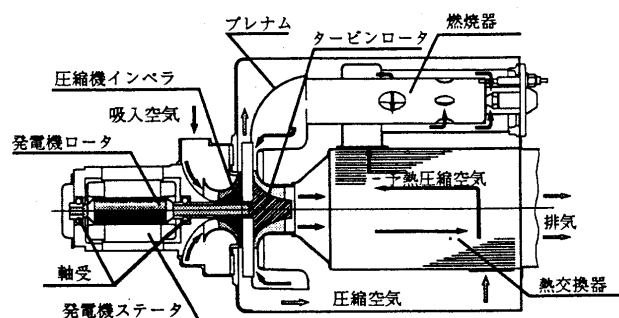


図1 本発電機用ガスタービンの構成

成を実現すると共に、エンジンの高温部分から発電機を分離している。燃焼器、タービン、熱交換器の高温部品をチャンバーに格納し、このチャンバー内を、圧縮機を出た圧縮空気で満たすことにより、高温部品からエンジン外部への伝熱量を低減している。発電機は、永久磁石式同期発電機を採用し、始動時のスタータモータを兼ねている。

このガスタービンと高速発電機を用いることにより、本発電機は、表2に示すように、従来のレシプロエンジンを用いた発電機と比較して、小型・軽量・低騒音・高電気品質を実現している。また、騒音の測定値は、レシプロエンジンを用いた発電機の中で、遮音に気を配ったモデルと同等の騒音レベルであるが、本発電機の発生する音は、高周波音が主であるため、遮音が容易であり、加えて殆ど振動が無いため、車両等への搭載に適している。

使用燃料は、ガソリンに比べて取り扱いが容易な軽油または灯油を用いることができるが、安価な灯油を用いることにより、レシプロエンジンを用いた発電機と同等のランニングコストで発電ができる。

これは、高温度効率の熱交換器により、排熱を回収することで、燃費を改善したため実現されている。また、熱交換器により、燃焼器に流入する空気を予熱することで、燃焼器入口温度が高く、燃焼器での温度上昇分を小さくでき、燃焼負荷率を小さくできる。これにより、無負荷から定格運転までの広い範囲で燃焼効率を高く保ち、排気中のTHC、CO等の成分を低く保つことができた。

以下に、このサイクル上重要な部品であり、多くの課題を解決して実現できた本発電機用熱交換器の開発について述べる。

### 3. 熱交換器の開発

本発電機の小型・軽量の特長を実現するため、熱交換器は、小型・軽量、しかも低コストで量産可能であることを目標として開発した。開発した熱交換器を、写真2に示す。

#### 3.1 熱交換器の課題

本熱交換器の開発の目標は、空気側温度効率78%以上とし、重量5kgとした。この目標を達成するため、写真

表2 レシプロエンジン発電機との比較

|       | Dynajet2.6 | レシプロエンジン発電機<br>(低騒音型) |
|-------|------------|-----------------------|
| 重量    | 1/2        | 1                     |
| 体積    | 1/2        | 1                     |
| 騒音レベル | 55 dB (A)  | 55 ~ 60 dB (A)        |
| 使用燃料  | 軽油もしくは灯油   | ガソリンまたは軽油             |
| 負荷耐力  | 定格出力の2/3   | 定格出力の1/3              |

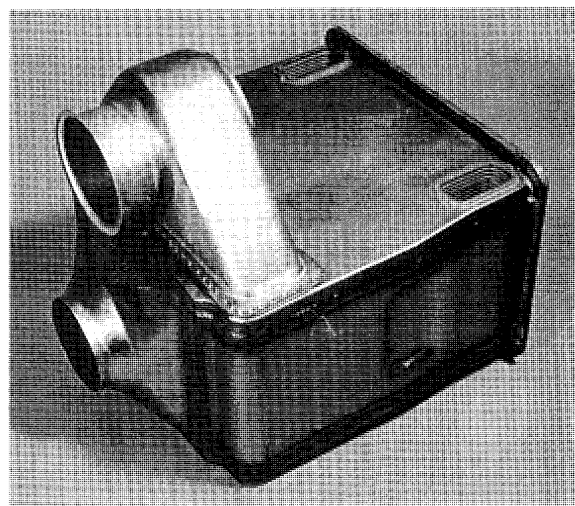


写真2 熱交換器外観

3で分かるように空気層44層、ガス層43層の多層構造を採ることにより、伝熱面積を大きくとり、図2に示すように低温空気と高温ガスが対向流となる構造とした。

さらに、軽量化と低コストを実現するために、熱交換器に適した材料の開発と、量産に適した熱交換器構造の採用の2つが課題となった。伝熱面積の大きな熱交換器を軽量にするには、従来のオイルクーラ等で用いられていない100 $\mu$ mの薄板材を、採用する必要がある。この材料は、熱交換器の使用環境下で十分な耐酸化性を有しているのに加え、熱交換器を低コストで製作するため、安価なものでなければならない。よって、高価な耐熱鋼でなく、安価なステンレス材で耐酸化特性に優れた材料が必要であった。加えて、本熱交換器では、加工コストを抑えるため、主要な部品をプレス成形で製作し、一度にろう付けするという工法を採用するため、ステンレス材料には、耐酸化特性だけでなく、プレス成形性、ろう付け性も同時に優れている必要がある。

このような、要求特性に適合するステンレス材料は、一般に熱交換器に用いられている材料には無かったため、専用の材料を開発することが課題となった。

また、小型・軽量の熱交換器とするためには、各空気層とガス層のシールをサイドバーで行うプレートフィン構造を採るのが有利である。そのため、開発当初は、このサイドバーを用いた構造を採用した。しかし、この構造は、品質を安定に保つことが難しく、組立コストが高

いため、この構造で量産するのは困難であると判断した。

このため、本熱交換器を、サイドバーを用いたプレートフィン構造に近い形状を持ちながら、量産に適した工法で低コストで、安定した品質で製作できる構造とすることが、課題となった。

そこで、オイルクーラで確立されている小型熱交換器の量産技術を、薄板、多層構造の本熱交換器に応用することとした。さらに、2枚の板をろう付け前にかしめることで、シール面を形成する工法や、ろう材を予めステン

レス板の両面にクラッドした材料を用いる等の工法を採用し、これに合った熱交換器構造とした。

### 3.2 材料開発

既に述べたように、熱交換器のコア重量を5 kg以下とすることを、開発の目標としているが、一般にオイルクーラ等で用いられている0.3 mm程度のステンレス板で熱交換器を構成すると、この目標重量を達成できないため、図3に示すようにチューブプレート板厚100  $\mu\text{m}$ 、フィン板厚40  $\mu\text{m}$ という非常に薄いステンレス板で熱交換器を構成している。

空気層とガス層の気密を保つプレートは、タービンから出た高温の燃焼ガス中で、十分な耐酸化特性を有し、高圧の空気圧及び、発電機の起動停止に伴う繰り返しの熱負荷に耐える強度を有しなければならない。

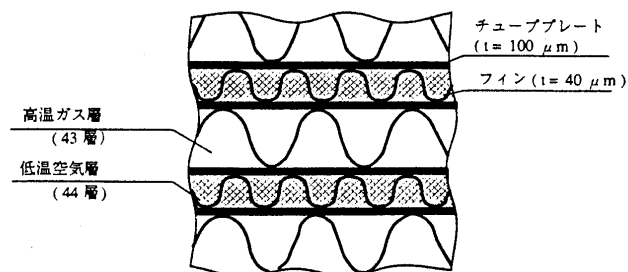


図3 チューブ断面図

本発電機の定格運転でのタービン出口温度は700°C以下であるため、SUS 304及びSUS 430であっても、素材の状態では、十分な耐酸化性を有している。しかし、チューブプレートは板厚100  $\mu\text{m}$ 、フィン板厚は40  $\mu\text{m}$ の薄板に圧延後、ろう付け工程で1100°Cを越える温度に加熱されるため、材料の耐酸化性は、素材の状態よりも低下してしまう。

例えば、写真4は、SUS 430をろう付け後、運転条件下で酸化試験を行ったものの断面であるが、粒界腐食していることが判る。これは、ろう付けの際の加熱により、粒界腐食鋭敏化したことが原因であると考えられる。

写真5は、SUS 304をろう付け後、運転条件下で酸化試験を行った断面を示したものである。この写真では、板材表面において、ろう材が粒界に溶け込み、このろう

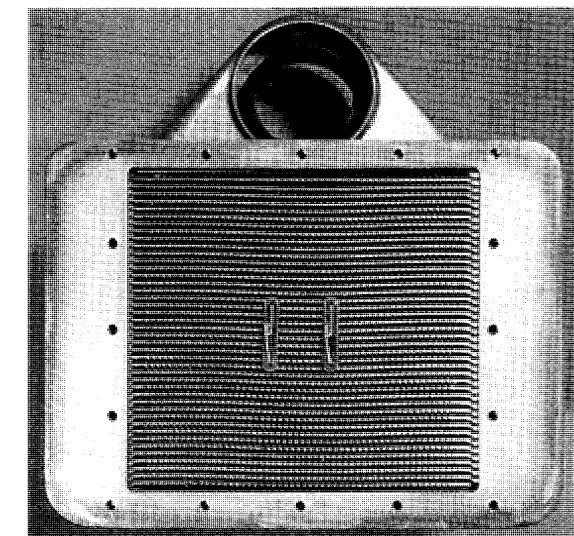


写真3 熱交換器（ガス出口）

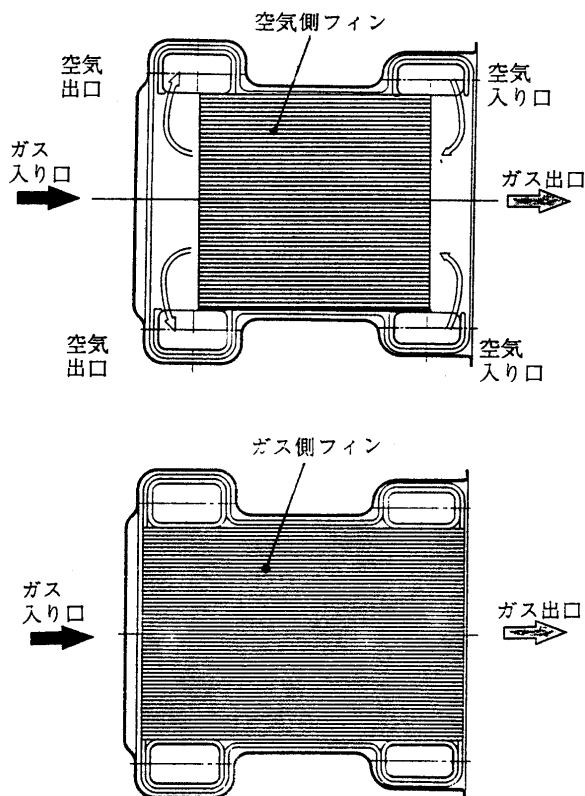


図2 熱交換器の流路形状 低温空気層（上段）  
高温ガス層（下段）

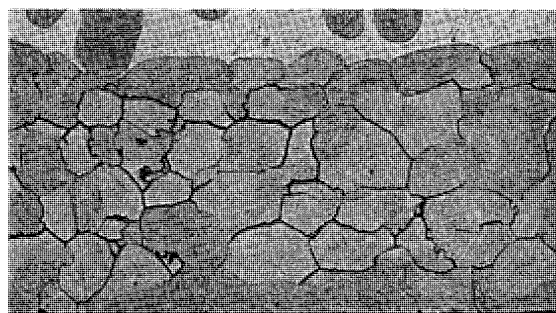


写真4 SUS 430の酸化試験結果

材が酸化しているのが判る。ろう材の溶けとけ込み量は、表面から数十 $\mu\text{m}$ 程度の範囲であるので、板厚が厚ければ酸化されない部分が残るが、100 $\mu\text{m}$ の板厚では、板厚全体にろう材が溶け込み、酸化する。そのため、材料が、運転中の熱応力で割れる原因となる。

これらのことから、一般に流通している SUS 430 や SUS 304 等の採用を断念し、必要な特性を有するステンレス材料を新たに開発した。

この材料に必要な特性は、上記 SUS 304 と同等の価格で、プレス加工及び、ろう付け後の耐酸化特性に優れ、熱交換器の部品形状を成形できるプレス加工性を有していることである。

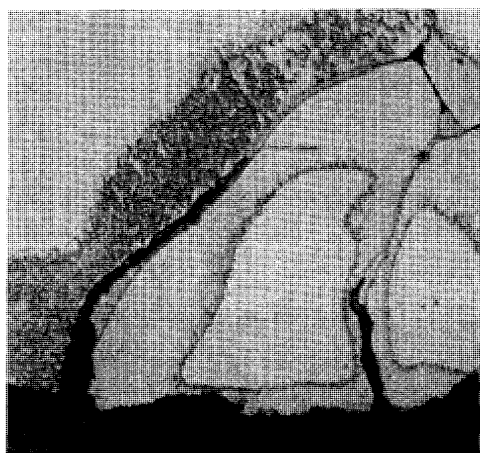


写真5 SUS 304 の酸化試験結果

ステンレス材料を開発する上で、先ずオーステナイト系ステンレスにするか、フェライト系ステンレスにするかを選択することになる。起動・停止の繰り返しの多い発電機の運転を考慮すると、熱交換器は、加熱と冷却を繰り返し受けることになる。オーステナイト系ステンレス材は、繰り返し加熱条件で酸化スケールが剥離し、100 $\mu\text{m}$ の薄いプレート材では、この酸化スケールの剥離が強度低下の原因となるため、酸化スケールの剥離の心配の少ないフェライト系ステンレス材を用いることにした。

次に、フェライト系ステンレス材である SUS 430 の試験の結果発生した粒界腐食を防ぐため、ろう付けの際に粒界腐食鋭敏化を低減するように、安定化成分となる Ti を含む材料 Alloy A を採用し、この Alloy A を用いて実際に熱交換器を試作した。しかし、Alloy A は、耐酸化特性及びプレス成形性については十分であったが、ろうの流れが SUS 430 に比べて劣り、試作した熱交換器にろう付け不良が発生した。この原因は、ろう付けの際に、酸化し易い Ti がステンレス材表面に酸化膜を形成し、この酸化膜のために、ろう材の流れが悪化したと考えられる。よって、Alloy A は、Ti を含む限り、ろう付け性を改善することはできないと判断し、Ti と同様に安定化成分である Nb を含有し、その上でプレス成形性等が最もよくなるように、成分調整を行い、表3に示した材料成分の新材料 Alloy B を開発した。

これら Alloy A と Alloy B の材料試験の一例を写真6及び、写真7に示す。写真6の上段は、ろう付け性を評

表3 新材料 Alloy B の化学成分例

| 材料      | (w t %)    |            |            |                  |                 |      |      |       |             |             |
|---------|------------|------------|------------|------------------|-----------------|------|------|-------|-------------|-------------|
|         | C          | Si         | Mn         | Ni               | Cr              | Mo   | Nb   | N     | P           | S           |
| Alloy B | 0.006      | 0.03       | 0.17       | 0.17             | 18.88           | 0.79 | 0.37 | 0.010 | —           | —           |
| SUS430  | 0.12<br>以下 | 0.75<br>以下 | 1.00<br>以下 | 0.6以下を<br>含有しても可 | 16.00<br>—18.00 | —    | —    | —     | 0.040<br>以下 | 0.030<br>以下 |

※SUS430は、JIS4305 (1991) による

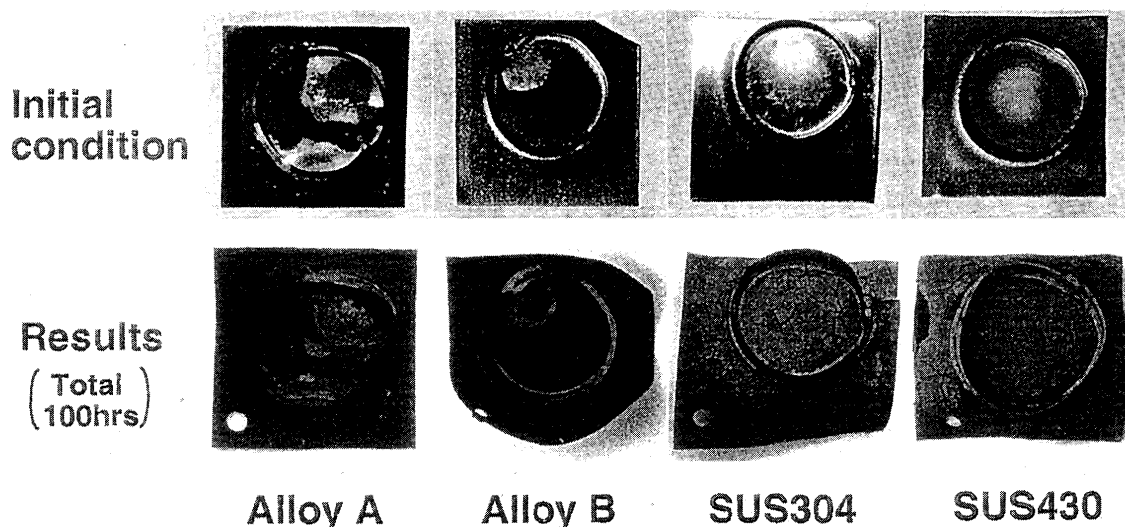


写真6 ろう付け試験 (上段)  
及び同じ試験片の耐酸化試験 (下段)

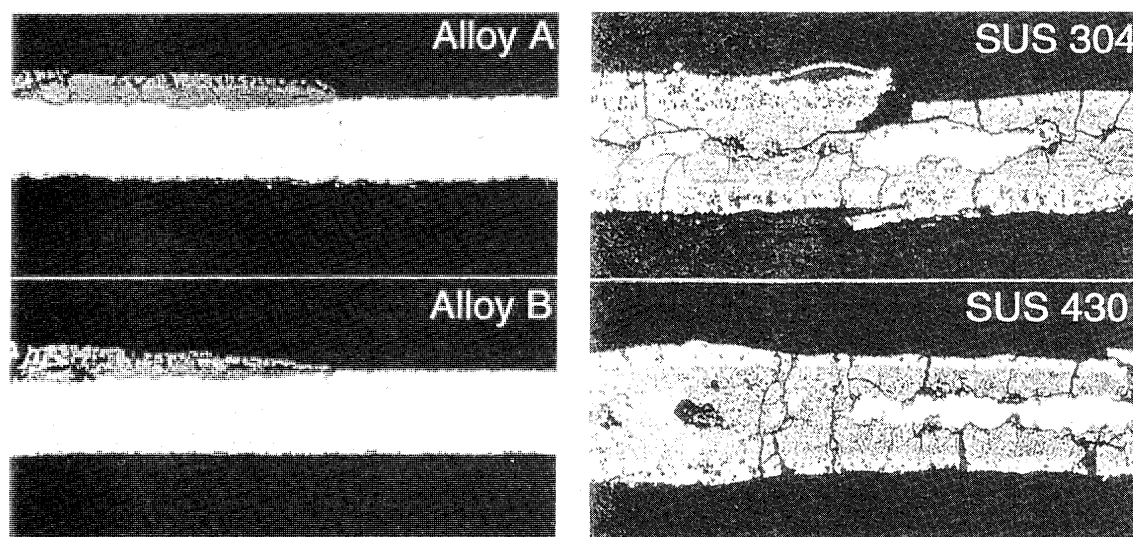


写真7 耐酸化試験後の断面

価するため、各材料にろう箔と鉄片を乗せて、ろう付け温度に加熱したもので、Alloy Aは、ろうの流れが悪く板表面にろう材が残るが、Alloy Bは、ろうの流れも良好で、他のステンレスと同等のろう付け性を持つことが確認できる。

写真6の下段及び写真7は、板厚100 $\mu$ mの材料をろう付け性試験後、繰り返し酸化試験(900 $^{\circ}$ C $\times$ 3時間、空冷10分、総計100時間)を実施した結果を示している。この結果から、SUS 304、SUS 430に比較して、Alloy A、Alloy B共に耐酸化性が優れていることが確認された。さらに、常温引張試験による伸び値の測定、エリクセン試験等によりAlloy Bが良好なプレス成形性を有していることが確認できたため、本熱交換器用の材料として最適であると判断した。

さらに、実際の熱交換器を試作することで、実物でのプレス成形性と、ろう付けによる気密の確保が確実にできることを確認し、量産に適用可能であると判断した。

その後、このAlloy Bを採用した熱交換器を、実機の運転及び、熱交換器専用の試験装置における運転条件を模擬した試験で評価した。その結果、Alloy Bは、本熱交換器の使用条件下において、粒界腐食を生じず、十分な耐酸化性を有していることが確認できた。

### 3.3 量産に適した工法及び構造の採用

まず、低コストで、品質の安定した量産ができるように採用した、2つの量産工法について説明する。

1つは、空気側のフィンに間に挟んだ2枚のステンレス板の全周をかしめることにより、図4に示すようなチューブ状に形成する方法である。これにより、空気側1層を一つの部品として扱えるため、組立が容易になり、さらに、かしめ部分でろう付け面の隙間を、容易に小さく管理できるため、この部分でのろう付けの品質を安定に保てる。

もう1つは、ろう材の取り付け方法である。薄いろう

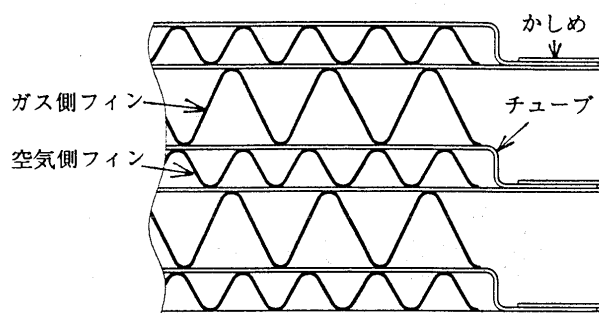


図4 かしめ構造

箔を、多くのシール面に取り付ける時間の掛かる工程を省くため、本熱交換器では、ステンレス材の両面にろう材を圧延したクラッド材を用いている。

しかし、クラッド材を用いると、ろう付け面でない部分にもろう材が存在するため、ろう材の流れが良好でないと、不必要な部分にろう材が残留し、流路の閉塞等の問題を生じる。そのため、ステンレス材料のろう付け特性が、より良好である必要があり、材料の選定では、ろう付け特性を重視し、ALLOY Bを採用することとした。

次に、圧力損失を低減するために行った構造上の工夫につき説明する。

図2は、上段に低温空気層の流路、下段に高温ガス層の流路を示している。これらの図で分かるように、空気の出入り口をチューブの4隅で、ガス側フィンの外側となる位置に設けた。これにより、空気層の外側を流れる流速が大きい燃焼ガスが、空気の出入り口によって、流路が狭められることなく流れるため、ガス側の圧力損失を低減できている。

さらに、高圧の空気層と低圧のガス層の流路断面積の比を1:2とすることにより、空気層での圧力損失率とガス層での圧力損失率の和を小さくしている。

表 4 熱交換器性能

|     |       |         |
|-----|-------|---------|
| 空気側 | 入り口温度 | 503 °K  |
|     | 入り口圧力 | 280 kPa |
|     | 温度効率  | 80 %    |
|     | 圧力損失率 | 2.4 %   |
| ガス側 | 入り口温度 | 963 °K  |
|     | 圧力損失率 | 4.0 %   |

このような形状の工夫の結果，表 4 に示すように，温度効率を含めて目標性能を達成し，小型，軽量の熱交換器を実現できた。

4. まとめ

小型 1 軸再生式ガスタービンと高速発電機の組合せにより，従来のレシプロエンジン発電機と比較し，小型・軽量・低騒音・低振動の携帯用発電機を実現した。

本発電機用熱交換器として，量産性に優れた構造を持ち，小型・軽量のレキュペレーターを開発した。

レキュペレーター用材料として，ろう付け性，ろう付け後の耐食性及び，プレス成形性に優れたステンレス材料を，材料メーカーと共同開発した。

5. 謝 辞

本熱交換器の開発には，東京ラヂエーター製造(株)並びに日本冶金工業(株)の多くの方々に，多大なるご協力をいただきました。ここで，改めて感謝いたします。

## 二次音源を利用した航空用ファン回転騒音の低減化の試み

## Experiment to Reduce Spinning Tone Noise Issued from a Ducted Fan Using Secondary Sound Source

石井 達哉<sup>\*1</sup>,

ISHII Tatsuya

小林 紘<sup>\*1</sup>

KOBAYASHI Hiroshi

生沼 秀司<sup>\*1</sup>,

OINUMA Hideshi

武田 克巳<sup>\*1</sup>

TAKEDA Katsumi

五味 光男<sup>\*1</sup>

GOMI Mitsuo

## Abstract

An application of active noise control (ANC) to reduce spinning tone noise issued from a fan of a turbofan engine is reported in this paper. The ANC technique using the wave form synthesis is tested experimentally instead of the adaptive feed forward method because it is expected to provide noise reduction without spill over of control sound in far field. To realize the wave form synthesis, it is necessary to form desired spinning patterns spatially by a secondary sound source. First of all, we constructed a system to generate spinning patterns in a duct, then tested the performance of the secondary sound source. As results of ANC tests applied to spinning tone noise of a model fan, noise reduction of maximum 3dB in overall sound pressure level and that ranging from 2dB to 13dB in blade passage frequency are obtained in far field with little spill over.

## 1. まえがき

本研究では、航空用エンジンのファンから発せられる騒音を能動的に低減するための基礎研究を進め、もっとも騒音レベルの高い回転騒音をナセル入口全方向で低減することを最終的な目標としている。近年、エンジンの高バイパス比化に伴いファン回転数が低下し、必要とされる共鳴吸音室の容積が増加する反面、重量軽減の制約からナセル内の吸音材設置スペースが減少する傾向にある。そこで、吸音ライニングに代わって、エンジンの運転状態の変化に追従でき、広帯域に渡って騒音低減効率が高く、コンパクトで耐久性のある騒音低減デバイスへの期待が高まってきた。騒音の能動制御技術は排気管、低回転プロア、イアマフなどに適用されつつあり、騒音低減の代替デバイスとして有望である。しかし、能動制御技術を航空用エンジンのファン騒音、とりわけスピニングノイズに適用するには、低減すべき騒音のモデル規範の設定やディストーション等の影響によるセンシングの安定性、制御音量のあふれ出し、及び軽量かつ高音圧音源装置の開発などの課題を克服する必要がある。

ファン騒音の能動制御に関しては、NASA Langley 及

び Lewis を中心に研究<sup>(1),(2),(3),(4)</sup>が進められてきた。DSP (Digital Signal Processor) を使った従来のアダプティブフィードフォワード制御を MIMO (Multi-Input Multi-Output) 系に適用した例では、半無響室に設置した JT 15 D のフロントファンから特定のスピニングパターンを励起させて、音響用スピーカを使って騒音の相殺を試みている。エラーセンサ付近では目標値への追従が認められるが、スピーカ間には位相の関連がないために発生する制御音のパターンが必ずしも騒音パターンと合致せず、放射全方向の騒音積算量を比較すると制御音のあふれ出し (Spill Over) が発生することが報告されている<sup>(5)</sup>。スピーカアレイに位相の関連を持たせて制御を施す試験例も報告されているが、目標値であるモデル規範の決定に労力を要するばかりか、エラーセンサーを放射音場に設置しなくてはならず、航空用エンジンに適用するには実用的ではない。エンジンダクト内のエラーマイクの擾乱に対する感度を高めた PVDF (Polyvinylidene-fluoride) フィルムセンサや、希少金属を使った高効率軽量音源、PZT を利用した流体音響素子の研究開発も同時進行中である<sup>(6),(7)</sup>。これとは別に、4 枚翼の小型ダクトファンから発生するファン単独スピニングパターンに対して、反位相のスピニングパターンをアナログデレイを使って送出し、放射騒音の低減を試みた例も報告されている<sup>(8)</sup>。いずれも特定のモードに対してトーンノイ

原稿受付 1996 年 12 月 26 日

\* 1 科学技術庁 航空宇宙技術研究所

〒182 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

ズを低減した例であり、Spill Over や運転状態の変化に対する追従性、複数のモード・周波数を持った騒音パターンへの低減性能を改善する余地がある。

制御音の Spill Over を解決し、追従性や複数成分の騒音に優れた低減性能を実現する上で、Wave Form Synthesis<sup>(9)</sup> は一つの有力な手法である。この手法は、伝播経路断面に音圧分布を持ち、現象に周期性をもった騒音場に有効である。二次音源を使って、騒音パターンの複製を生成し、現象の開始タイミングに適度な遅れを持たせて複製を送出することで、空間的な騒音の相殺が可能である。この方法では、騒音パターンの周期性を仮定するために、リアルタイムのフィードバックは不要であり、一旦モードの同定と複製の送出手が完了すれば、騒音制御系は外乱に対して安定して動作するという利点がある。つまり、騒音を構成するモードが変わらなければ、系の運転状態の変化に応じて制御音の周波数が追従するために、安定した制御を持続することが期待できる。アダプティブ法で使われるエラーセンサの設置箇所を最小限に止めることができる上、モデル規範を設定する労力も軽減できる。

Wave Form Synthesis を確立するためには、騒音場を正確に予測する技術と任意の再生音場を送出する技術が不可欠となる。スピニングパターンの観測と予測法については既にいくつかの報告があり<sup>(11),(12),(13)</sup>、構成モードの特定が正しければ、エラーセンサからの情報をもとに高い精度でモードの分離をすることができる。特定のスピニングモードを発生させるには、モータを駆動する要領と同様に、アクチュエータアレイを特定の位相間隔で駆動すればよい。モードの数が増えれば、モード間の位相・振幅関係を考慮して、各アクチュエータに合成信号を送ればよい。合成信号は各チャンネルで異なっているために、独立に任意波形を発生できる多チャンネル信号発生器が必要となる。これを使うことで、任意の複数の周波数・モードを持ったスピニングパターンを同時に出力することができ、複数の騒音成分を同時に低減することが可能となる。本報では、スピニングパターン再生システムを使った二次音源の性能試験結果と、二次音源をモデルファンに適用した時の騒音低減試験結果の一例を報告する。

## 2. スピニングパターン再生システム

個々のスピニングモードを発生させるのに必要なデジタル制御信号を合成することで、複数のスピニングモードを生成することに着目し、多チャンネルの信号発生器（シンセサイザ）を中心にスピニングパターン再生装置を設計・製作した。図1にシステムの概要を示す。装置は、無響室（4100 mm × 5700 mm × 3400 mm）、試験用音響ダクト（内径 490 mm × 2700 mm）、制御音発生用アクチュエータアレイ及び増幅器、16 チャンネルシンセサイザ、フラッシュマウントマイクロホンアレイ、トラ

バースリングとプローブマイクロホン、コントローラから成り立っている。試験用音響ダクトは、一端を吸音材で塞ぎ、もう一端をベルマウスを介して無響室に連結している。音源として、音響用ドライバユニット（Fostex 製、FD 101）16 個を、ダクトの閉端近くの同一円周上に等間隔で設置した。各ドライバユニットは、16 チャンネルシンセサイザによってそれぞれ独立に制御信号を与えられて動作する。個々のユニットには 4~40 W の入力を与えた。ドライバユニットアレイよりも上流側、つまり無響室側には円周方向とダクト軸方向にそれぞれ 10°、25 mm 間隔でフラッシュマウントマイクを設置するためのタップが切っており、マイクを使用しないときには孔を塞ぐ仕組みとなっている。これらのアレイによって音響データの観測が行われ、その結果からモードの同定ができる。フラッシュマウントマイクアレイの上流側には、プローブマイクの受圧孔をダクト断面の任意の位置に移動するためのトラバースリング装置を設置した。

Wave Form 生成の要である 16 チャンネルシンセサイザは、コントローラから送られる各チャンネルのデジタル波形信号をアナログ変換し、アクチュエータに制御信号を送出する機能を持つ。本機の特徴は、チャンネル間の動作を独立してできる点、及びコントローラで計算した任意のデジタル波形を発生することができる点にある。最大周波数は 20 kHz × 16 CH., 2048 点の分解能で任意波形を各チャンネルに設定できる。例えば、純音で 5 枚のローブパターンを出すためには、正弦波のデジタル波形を生成し、チャンネル間に位相差、

$$\phi = \frac{360 \times N_{lobe}}{M_{actuator}} = \frac{360 \times 5}{16} = 112.5^\circ \quad (1)$$

( $N_{lobe}$ : ローブ枚数,  $M_{actuator}$ : アクチュエータ数)

を持たせた波形データを各チャンネルのメモリに転送すればよい。アクチュエータ数は 16 個であるため、8 枚のローブについては隣り合うチャンネル間の位相差が 180° となり、スピニングパターンは生成されない。ゆえにシステムで実現が可能なローブ数は、 $m=1\sim7$  となる。静止時の  $m=1$  モード（半径方向次数  $\mu=0$ ）の遮断周波数を計算すると 410 Hz であり、同じく ( $m, \mu$ ) = (2, 0) モードの遮断周波数は 680 Hz である。

発生したスピニングパターンを観測するには、プローブマイクをトラバースするか、或はフラッシュマウントマイクアレイを使う。今回の試験では、円周方向のローブ数にのみ着目するため、可動リングの壁面にマイクロホンを固定し、これをトラバースすることで、ダクト内壁面の円周方向の音圧と位相の分布を計測し、発生したスピニングパターンを同定するに止めた。まず、各計測位置でリファレンスセンサとプローブマイクロホンの同時計測をする。次に、計測した両データを翼通過周波数（Blade Passage Frequency）を中心周波数とする狭帯域フィルタにかけて音圧分布とリファレンスセンサとの



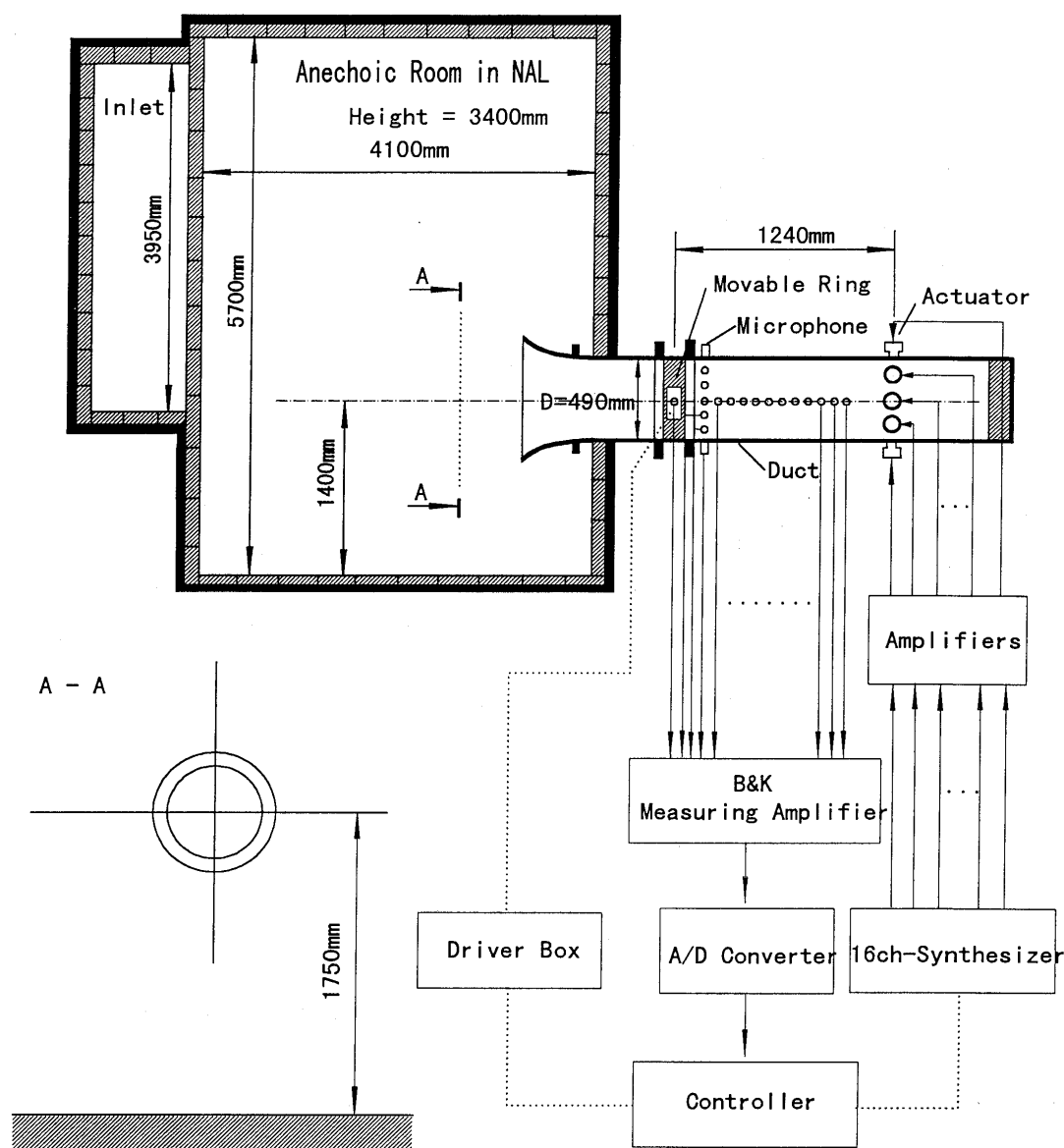


図1 スピニングパターン再生システム概略図

位相差分布を算出する。リファレンスセンサは、いわばトリガの役割を果たしており、データ収録時やフィルタ処理における位相の遅れの影響は排除される。単一のスピニングモードが発生していれば、トラバース位置を $0\sim 360^\circ$ 変化させた時に、音圧レベルは平坦な分布を示し、リファレンスセンサとの位相差については、 $-180\sim +180^\circ$ 間の直線分布がローブ枚数分だけ現れる。なお、直線分布の傾き方向はスピン方向に対応する。

### 3. 制御音の性能試験とモデルファンからの騒音モード計測

制御音の性能試験条件は、能動制御を施すモデルファンの運転条件から決定した。モデルファンは、16枚のFRP製ブレードとその上流側に等間隔で設置された15本の干渉促進用ロッドで構成される。ブレード・ロッド間の干渉によりローブ枚数1のスピニングパターンが強く励起される。能動制御試験の第一段階として単一モー

ドの騒音低減を目指し、運転回転数を下げて、(1, 0)～(2, 0)モードのみがカットオンとなる条件で試験することにした。回転数は4000～5250 rpmであり、翼通過周波数は1066～1400 Hzであった。試験条件を表1に示す。

ケースAの結果を図2Aに示す。図の横軸はトラバースしたマイクロホンの円周方向座標を表し、上側は入力周波数成分の音圧レベルを、下側はリファレンスセンサに対する位相ずれを表す。発生した音響モードが定在波であれば、音圧レベルに分布ができ、位相については断続的に逆位相の分布が繰り返される。図2Cに非回転の定在波を発生させた時の計測結果を示す。これに対してスピニングパターンは圧力パターンがダクト内壁面を擦って伝播するために、時間的平均音圧レベルは、円周方向に一樣となる。図2Aはスピニングパターンの生成を暗示している。位相ずれの分布を見ると、右上がりの直線分布が1本存在し、観測者が $360^\circ$ 移動する間にロー



表 1 制御音の性能試験条件

|           | A:(1,0)モード<br>発生試験 | B:(2,0)モード<br>発生試験 |
|-----------|--------------------|--------------------|
| 入力周波数     | 1000 Hz            | 1000 Hz            |
| チャンネル間位相差 | 22.5°              | 45.0°              |
| 入力パワー/CH  | 13W                | 13W                |

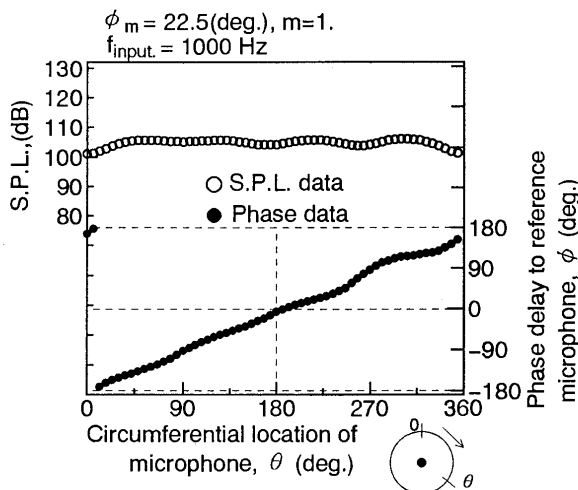


図 2 A 制御音の性能試験結果 (ケース A)

ブの位相が  $360^\circ$  変化する。音圧レベルの結果と併せて考慮すると、トラバース方向に回転する 1 枚のローブを持ったスピニングパターンが計測されたことがわかる。モデルファンのブレードと前置干渉ロッドから発するスピニングモードのうち、 $m=1$  の次にありうるモード  $(2, 0)$  に対処するために、ケース B にて試験した結果を図 2 B に示す。ケース A と同様に音圧レベルは一樣であり、位相分布には右上がりの直線分布が 2 本存在することから、2 枚のローブを持ったスピニングパターンの生成を確認できる。さらにローブ枚数を増やすには隣り合うアクチュエータのチャンネル間に与える位相差を増やせばよい。ケース A, B ともに生成するには、それぞれのモードに対応した制御信号を合成すればよい。複数のモードだけでなく複数の周波数成分を含んだスピニングパターンを送出できるため、複数の成分を持ったトーンノイズを同時に低減することが可能である。

制御すべき騒音パターンを同定するために、試験ダクトをモデルファンに接続して、ファン・干渉促進ロッドから発せられる騒音パターンをトラバースマイクにて計測した。ファン運転回転数 5250 rpm における翼通過周波数成分 (BPF 成分) について、ダクト内壁面上の音圧レベルと位相分布を計測した結果を図 3 に示す。図中点線はデータを直線回帰した結果である。位相分布に着目すると、右下がりに 1 本の直線相関が存在することが認められ、この回転数以下では、トラバース方向と逆方向に回転するスピニングパターン ( $m=1$ ) が強く励起されていると考えられる。このパターンの複製を生成できるように二次音源の駆動・制御をする。

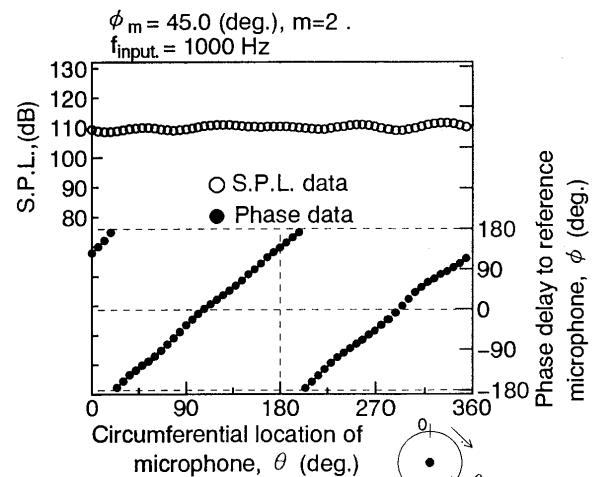


図 2 B 制御音の性能試験結果 (ケース B)

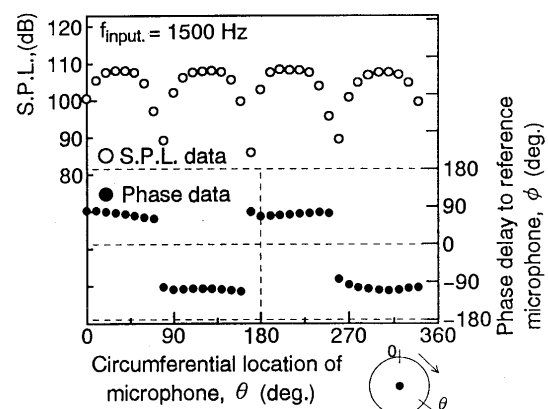


図 2 C 制御音の性能試験結果 (定在波)

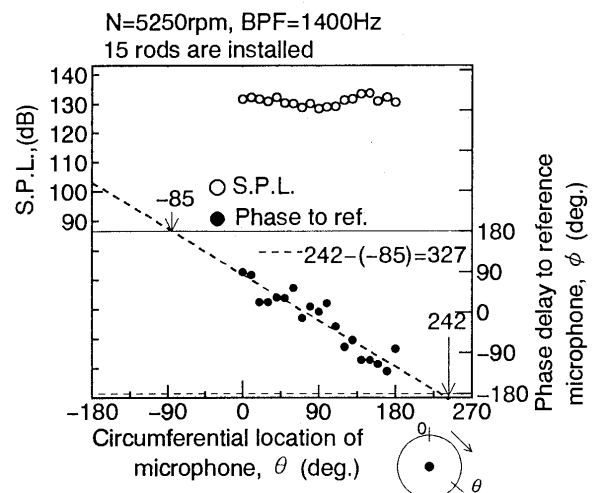


図 3 モデルファンから発生するスピニングパターンの計測結果

#### 4. モデルファンを使った回転騒音低減試験

二次音源からの複製音場をモデルファンの騒音場に適用する際に注意しなければならないことは、騒音現象の開始時期を感知して、適度な遅延を施し、複製音場を騒音場に同期させることである。現象の開始時期は翼の通過をセンシングすることで決定されるが、今回用いたモ

デルファンはFRP製であるために、従来の渦電流型センサを用いることができない。翼面上の光の反射を光ファイバで伝送する方式では、複雑な翼形状や短いチップ幅のわずかな通過時間を安定して感知することが困難である。そこで、ファンのシャフトに翼枚数分の反射スリットを塗布し、スリットの反射をファイバセンサで感知する方式を採用した。この方式を使う利点は、安価でシステムの構成が可能なこと、スリットの通過によるパルスの挙動が安定しており遅延・同期に適すること、スリットの数を2倍、3倍とすることで高調波成分の遅延・同期を独立して行うことも可能であることなどが挙げられる。同軸反射型ファイバセンサユニット (Keyence 製 FU-35 FA, FS 2-65) の出力信号は、遅延信号発生器 (Stanford 製, DG 535) で時間遅れを伴ってシンセサイザの外部同期入力端子に送られる。シンセサイザから発せられる全チャンネルの制御信号は、外部同期入力周波数に変調されるとともに、遅延信号発生器で設定された遅れ時間を伴って送出される。これらの遅延・同期システムもまたコントローラで制御可能な状態となっている。

3節の結果を考慮して、ファン回転数を4500 rpm (翼通過周波数1200 Hz) に設定し、制御音として  $(m, \mu) = (-1, 0)$  のスピニングモードを送出し、振幅・遅延時間を調節してエラーセンサが最小値を示す制御量を決定

した。非制御時・制御時の放射場の騒音分布を計測するために、ブームマイクロホン<sup>10)</sup>を10°おきにトラバースした。今回の試験ではWave Form Synthesisによる能動制御の可能性を調べることを目的としており、エラーセンサをダクト内ではなく、放射場中のダクト出口直進方向から20°方向に設置した。図4には、ダクト端からの翼通過周波数成分 (BPF 成分) とオーバーオールレベルの騒音分布を制御時と非制御時で比較した結果を示す。BPF 成分には10~80°方向で一様に2~13 dBのレベルの低下が見られ、二次音源のつくる複製音場が騒音パターンと合致し、Spill Overのない騒音低減が実現されている。図5では、最も低減効果の得られた10°方向のスペクトル分布を制御時、非制御時で比較した。BPF 成分は広帯域騒音レベルにまで低減されている。一方、高調波2 BPF 成分には制御が施されておらず、制御時には卓越成分となって残存している。この結果、オーバーオールレベルの放射特性は、BPF 騒音成分が卓越している0~50°方向では、最大3 dBの様に低下する傾向を見せるが、2 BPF 騒音成分が卓越する50~90°方向では、低減効果はほとんど見られない。

今回の結果をふまえて、複数のローブパターン・周波数成分を持ったスピニングノイズの複製をアクチュエータにより発生させて、卓越する離散周波数成分すべてを

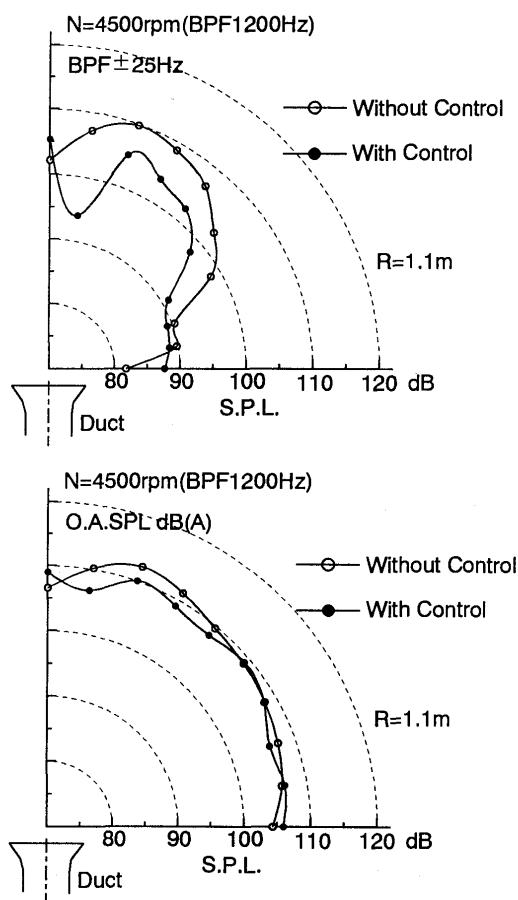


図4 ファンダクト出口からの放射騒音分布,  
(上: 翼通過周波数成分, 下: オーバーオールレベル)

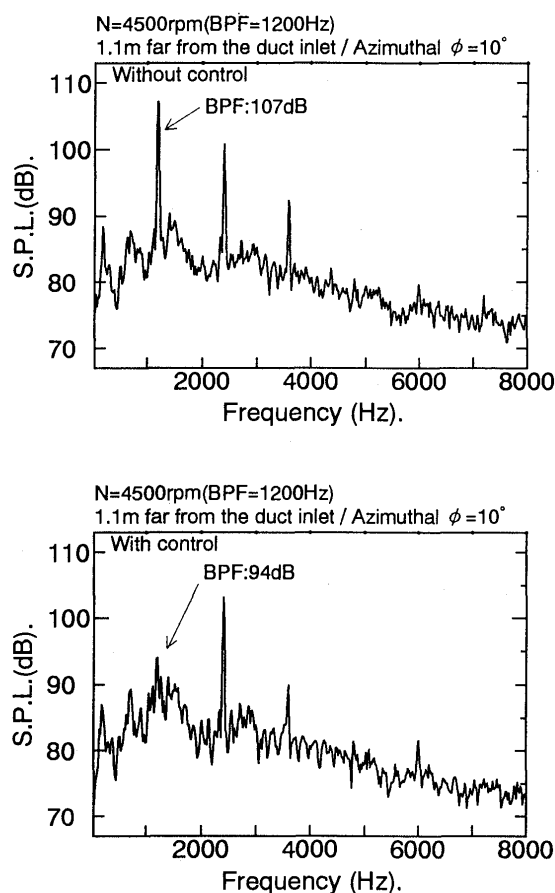


図5 ファンダクト出口遠方の騒音スペクトルの比較,  
(10° 方向, 上: 非制御時, 下: 制御時)

低減し、放射音場全方向に渡ってオーバーオールレベルを Spill Over なく低減することを次の段階の目標とする。

## 5. まとめ

航空用ファンから発せられる騒音のうち、特にスピニングトーンノイズを能動的に低減する研究の第一段階として、任意の制御音を送出できるスピニングパターン再生システムを製作し、その性能を試験した。これをモデルファン装置に適用し、二次音源を使った能動制御の可能性を調べた。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 制御音発生装置を使ってアイドリング時のファン運転状態に適用できるスピニングモード (109~126 dB/1000 Hz) を安定して発生することができた。デジタル波形の合成を行えば、ローブ数の異なる複数のスピニングモードを制御音として発生させることが可能である。
- (2) 二次音を送出するタイミングの制御法として、安価で耐久性があり、かつ擾乱に対して安定な光ファイバセンサを利用した観測・遅延方法を採用し、制御システムに組み込んだ。
- (3) 能動制御の例としてファン回転数 4500 rpm にて試験を行ったところ、ファン直前方及び垂直方向を除い

た全放射方向でオーバーオールレベルで最大 3 dB、翼通過周波数成分にして最大 13 dB の低減を達成することができた。

## 参考文献

- (1) R. H. Thomas, et al., AIAA-93-0597, (1993).
- (2) R. A. Burdisso, et al., AIAA-94-0361, (1994).
- (3) C. H. Gerhold, 16<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustic Conference (1995), pp. 187-193.
- (4) R. A. Burdisso and C. R. Fuller, 16<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustic Conference (1995), pp. 231-237.
- (5) R. H. Thomas, et al., AIAA-Journal, Vol. 32-1, (1994), pp. 23-30.
- (6) R. A. Burdisso, et al., 16<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustic Conference (1995), pp. 177-184.
- (7) T. M. Drzewiecki, et al., 16<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustic Conference (1995), pp. 455-463.
- (8) D. L. Sutliff and R. T. Nagel, AIAA-93-4356, (1993).
- (9) W. Neise and G. H. Koopman, Proceedings of Inter Noise 88, (1988).
- (10) J. M. Tyler and T. G. Sofrin, S. A. E. Trans., Vol. 70, (1962), pp. 309-332.
- (11) P. D. Joppa, AIAA-84-2337, (1984).
- (12) G. F. Pickett, et al., NASA-CR-135293, (1977).

## 自動車用 100 kW CGT の要素組合せ評価試験

## Development in the Full Assembly Test Rig of the 100kW Automotive Ceramic Gas Turbine

中沢 則雄<sup>\*1</sup>, 荻田 浩司<sup>\*1</sup>  
 NAKAZAWA Norio OGITA Hiroshi  
 高橋 政行<sup>\*1</sup>, 川口 能広<sup>\*1</sup>  
 TAKAHASHI Masayuki KAWAGUCHI Yoshihiro

## Abstract

“Development of 100kW Automotive Ceramic Gas Turbine (CGT)” is a seven-year program since fiscal 1990. This program has been carried by Petroleum Energy Center (PEC) with the support of the Ministry of International Trade and Industry.

As a bench test to prove the CGT performance, full assembly evaluation tests are being conducted. Using a full assembly test rig where all components are mounted in the engine housing, we are not only evaluating its overall function and performance, but also measuring temperature, pressure and other data from each component or component interface under the actual engine condition to evaluate the performance of each component for feedback to the development of components.

The maximum output power of 76.5kW (goal: 100kW) and the maximum thermal efficiency of 31% (goal: 40%) were achieved at 1200°C TIT (Turbine Inlet Gas Temperature). And a preliminary test at 1300°C TIT was conducted successfully.

## 1. まえがき

通産省資源エネルギー庁の補助事業である“自動車用 100 kW セラミックガスタービン (CGT) の開発”が 1990 年度から 7 年間の計画で(財)石油産業活性化センターを中心に推進されている。開発目標は下記の通りである。

- ・最大出力 : 100 kW
- ・最高熱効率: 40%

[TIT (タービン入口ガス温度) : 1350°C]

- ・排気特性 : ガソリン乗用車モード規制値適合

CGT の性能を台上試験で実証するため、エンジンハウジングに全要素を組み込み、全体としての機能、性能を評価するとともに、各要素の境界部の温度、圧力等を計測し、エンジンと同等条件での要素性能を評価し、要素開発にフィードバックする要素組合せ評価試験を進めている。本報では全セラミック部品を組み込んだ TIT: 1200°C レベルでの性能評価試験結果と TIT: 1300°C での機能評価試験結果について報告する。

## 2. 要素組合せ試験機の構造

CGT エンジンとは遠心圧縮機とラジアルタービン各 1

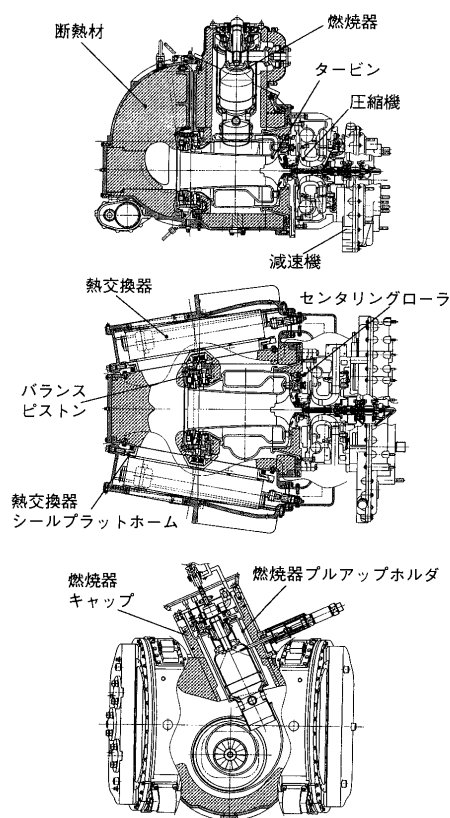


図 1 要素組合せ評価試験機

原稿受付 1997 年 1 月 24 日

\* 1 (財)日本自動車研究所 (JARI)

三菱自動車工業(株) 〒146 東京都大田区下丸子 4-21-1

段で構成される高速軸と、上部に缶型燃焼器を、両側に回転蓄熱式熱交換器を配する圧力比 5 の 1 軸再生式である。高速軸には高減速比(=18.33)で無段変速機(CVT)を介して車両側駆動軸に動力を伝達する減速機が結合されている。

要素組合せ試験機は各要素の配置と組立構造をエンジンと同一とし、各要素の性能と機能を明確に把握するため、各要素および要素間の境界部に計測センサを設置している。ハウジングは小型軽量化よりも、製作と計測の容易さを優先した設計となっている。機能構造面では図 1 に示すように、エンジン設計時に計画した下記特徴をもっている。

- (1) タービンロータ周りのセラミック静止構造部品は個々のセラミック部品を積重ねた構造で、金属製ハウジングとの熱膨張差をベローズとバネで構成されるバランスピストン機構で吸収、かつ弾性的に支持する構造。
- (2) タービンロータとシュラウドとの同心度保持機能は、玉軸受を保持する金属製ベアリングハウジングとタービンノズルに設けているラジアルキー溝に転がり接触で噛合う 3 個のローラにより作動。金属構造とセラミック構造の熱膨張差をローラの転動で吸収するとともに、セラック構造側からの熱伝導接触面積を極力低減する構造。
- (3) 燃焼器のライナ部も積重ね構造で、燃焼器キャップ側のバネにより弾性的にプルアップホルダに押付ける構造。
- (4) 熱交換器シール性能はシール相手座面の平面度確保が重要であるため、ハウジングとシールとの間に金属製ベローズとセラミック製プラットホームを設け、ハウジングの熱変形をベローズで吸収するとともにセラミック製プラットホームにより平らなシール座面を保持する構造。

CGT 開発はいくつかのチームに分かれて図 2 に示すような体制と分担により、要素とそれらを組合せた試験およびエンジンの開発試験を実施している。個々の部品および要素開発は併行して進め、複数の部品および要素を組合せた試験、全要素を組合せた評価試験、エンジン試験へと段階を追って相互に評価試験を確認し、問題点の把握と対策を図りながら進めている。

要素組合せ評価試験はエンジン構造における各要素の特性把握とエンジン基本性能評価を目的とし、エンジン開発と要素開発の間をつなぐ試験装置である。

### 3. 試験装置と計測システム

本試験機はエンジン条件での全体の機能、性能および要素性能の評価を目的としているため、制御系と補機は装着していない。直流動力計により起動し、動力吸収、回転数設定、燃料供給系、点火系、潤滑系、補助空気供給系は基本的には全て手動操作する。また、熱交換器は油圧モータ駆動で、VIGV (圧縮機可変入口案内翼) も油圧アクチュエータ駆動であり、任意に設定可能である。図 3 に試験機の計測項目と計測位置を示す。

本試験装置は圧力、温度、回転数、流量、振動等につき 200 点以上を同時計測し、データ処理装置により各要素の性能パラメータをリアルタイムで解析表示し、主要監視項目の表示と許容値を越えた場合の警報または自動停止機能も備えている。燃焼器用、冷却用補助空気および潤滑油は外部から供給しているが、要求される供給条件に合わせて的確に制御するとともに、供給先毎に個別に制御計測しており、動力損失と各要素間の流量バランス、動力バランスを高精度に解析評価することができる。高温のセラミック構造に接する金属部分は(1)バランスピストン部分、(2)ベアリングハウジング、(3)燃焼器キャップ、(4)熱交換器シールプラットホームとハウジング間のベローズ構造部分であり、冷却空気の供給量を制御し、

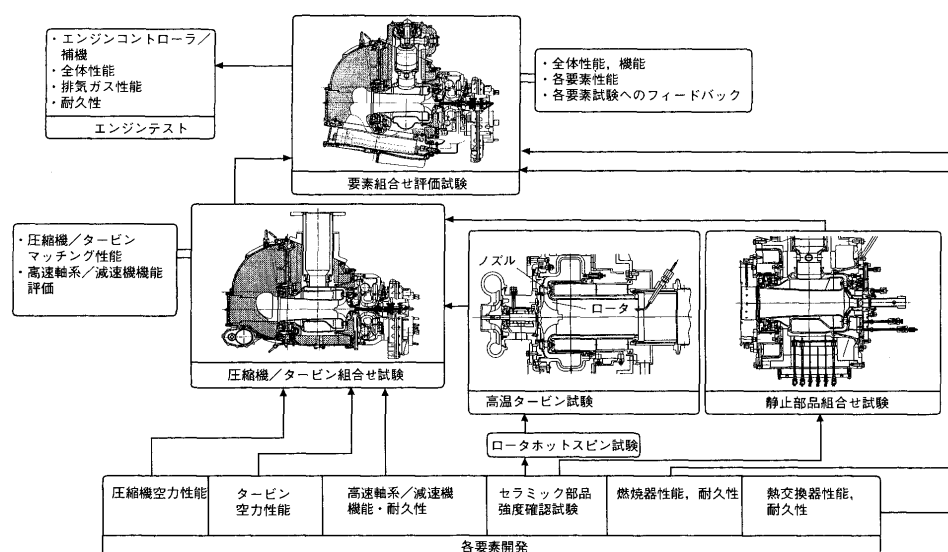


図 2 100 kW CGT 開発体制と分担

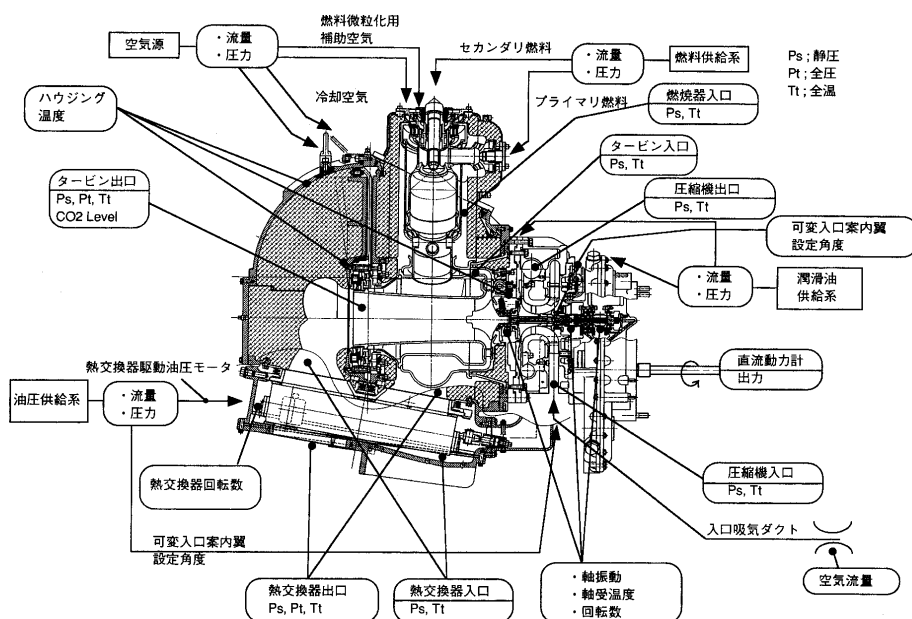


図3 計測データと計測位置

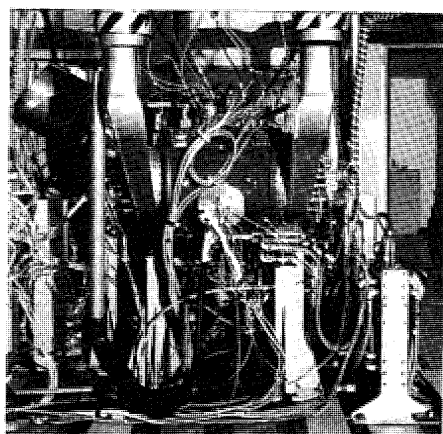


図4 試験機と操作室

材料の許容温度以下に管理している。熱損失は各要素間の熱バランスとハウジングの温度分布から推定する。図4に本試験機の装置への装備状況と操作室を示す。

#### 4. 計測データの解析と性能評価手法

計測データの中で比較的精度の高い圧力、流量、および十分混合され熱伝達と温度分布に起因する誤差の小さいステーションの温度を入力データとして、各要素間の動力、流量、および熱のバランスから他のステーションの状態量と各要素性能を解析的に求める。図5に解析フローを示す。本解析のなかで重要となる熱交換器漏れ量は、タービン出口部分で計測した排ガス成分から燃空比を算出し、燃料流量計測値からタービン出口での空気流量を求め、圧縮機入口空気流量計測値との差から算出している。また、動力損失は高速軸系および減速機の単体試験での潤滑条件と動力損失のデータから求めている。

### 5. 目標性能と性能評価状況

#### 5.1 目標性能<sup>(1)</sup>

表1に1993年度の中間評価結果をベースに再設定したエンジンの最終目標仕様を示す。定格点（出力100 kW）と2点の最高熱効率点（熱効率40%）の作動条件と、各要素の目標性能と損失量、漏れ量を規定した。

仕様見直しの要点は下記の通り。

- (1) セラミック材料の高温長時間強度の現状からタービンロータの周速を下げ、定格回転数を110,000 rpmから100,000 rpmに変更。
- (2) 圧縮機は中間評価時点での単体性能試験結果から判断し、圧力比5の定格性能達成上、定格回転数は110,000 rpm（インペラ外径95 mm）よりも、100,000 rpm（インペラ外径104 mm）の方が有利。
- (3) 最大出力を確保するため、空気流量を増大し、最高熱効率点はタービンと圧縮機をより高効率でマッチングさせるため、VIGVを効果的に活用。

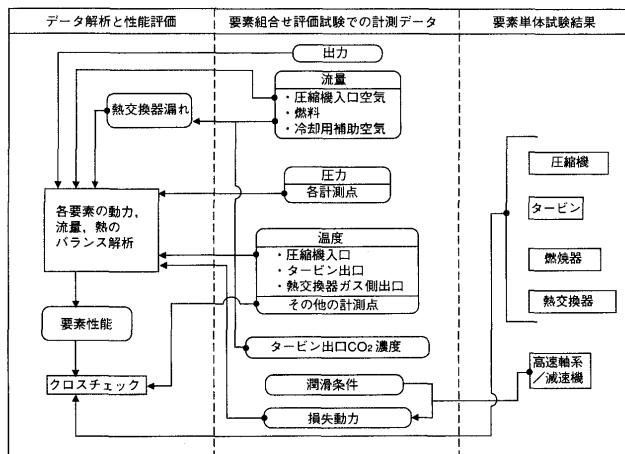


図5 データ解析の流れ

表1 最終目標仕様

|      | 仕様項目 (VIGV deg)                      | 最大出力点         |              | 最良燃費点        |  |
|------|--------------------------------------|---------------|--------------|--------------|--|
|      |                                      | 10万rpm(0)     | 10万rpm(40)   | 9万rpm(40)    |  |
| エンジン | 出力 kW (PS)                           | 105.7 (143.7) | 92.6 (125.9) | 69.9 (95.0)  |  |
|      | 熱効率 % (g/PS)                         | 38.2 (160.9)  | 40.4 (152.0) | 40.7 (151.0) |  |
|      | 圧縮機                                  |               |              |              |  |
| 圧縮機  | 入口圧力 kg/cm <sup>2</sup> a / 温度 °C    | 1.016/15      | 1.020/15     | 1.024/15     |  |
|      | 空気流量 kg/s                            | 0.4727        | 0.4137       | 0.346        |  |
|      | 圧力比                                  | 4.957         | 4.329        | 3.599        |  |
| タービン | 効率 $\eta_{T-T}$ %                    | 77.8          | 81.4         | 83.0         |  |
|      | ガス流量 kg/s                            | 0.4487        | 0.3915       | 0.3262       |  |
|      | 出力圧力 kg/cm <sup>2</sup> a / 温度 °C    | 4.784/1350    | 4.200/1350   | 3.508/1350   |  |
| 燃焼器  | 燃料流量 kg/h [g/s]                      | 23.13[6.43]   | 19.13[5.31]  | 14.35[3.99]  |  |
|      | 燃空比                                  | 0.01453       | 0.01376      | 0.01237      |  |
|      | 燃焼効率 %                               | 99.5          | ←            | ←            |  |
| 熱交換器 | 圧力損失 %                               | 3.47          | 3.40         | 3.33         |  |
|      | 燃料                                   | 軽油又は灯油        | ←            | ←            |  |
|      | 高圧側入口圧力 kg/cm <sup>2</sup> a / 温度 °C | 4.970/228     | 4.362/198    | 3.643/168    |  |
| 圧力損失 | 高圧側入口空気流量 kg/s                       | 0.464         | 0.4059       | 0.339        |  |
|      | [高圧側通過空気流量]                          | [0.4477]      | [0.3911]     | [0.3264]     |  |
|      | 高圧側圧力損失 %                            | 0.27          | 0.31         | 0.38         |  |
| タービン | 低圧側入口圧力 kg/cm <sup>2</sup> a / 温度 °C | 1.113/950     | 1.102/974    | 1.091/1017   |  |
|      | 低圧側入口ガス流量 kg/s                       | 0.4596        | 0.4014       | 0.3347       |  |
|      | 低圧側圧力損失 %                            | 6.56          | 5.80         | 4.99         |  |
| 動力損失 | 洩れ % *1 (g/s)                        | 4.62 (21.8)   | 4.76 (19.7)  | 4.93 (17.1)  |  |
|      | 温度効率 %                               | 92.5          | 93.4         | 94.5         |  |
|      | 入口損失 %                               | 1.69          | 1.30         | 0.91         |  |
| 熱損失  | コンプレッサ〜熱交圧損 %                        | 1.28          | 1.20         | 1.13         |  |
|      | タービン〜熱交圧損 %                          | 4.01          | 3.23         | 2.41         |  |
|      | 排気圧損 %                               | 0.58          | 0.42         | 0.29         |  |
| 熱損失  | 軸損失 kW (PS)                          | 4.8 (6.5)     | ←            | 3.8 (5.2)    |  |
|      | 補機駆動動力 kW (PS)                       | 3.4 (4.6)     | ←            | 3.0 (4.1)    |  |
|      | 熱損失 kcal/h                           | 9500          | 8300         | 6900         |  |
| 熱損失  | 熱交以外の洩れ % *1                         | 1.83          | 1.89         | 1.95         |  |

\*1 圧縮機空気流量に対する比率

定格点と最高熱効率点のエンジン各ステーションの状態量と各要素に要求されている性能をそれぞれ図6, 7に示す。

## 5.2 性能評価状況<sup>(2),(3)</sup>

図8に TIT: 1150~1170°Cでの圧縮機性能特性上の作動点と性能値を示す。修正回転数  $N_c = 80,000 \sim 95,300$  rpmで出力  $L = 53.7 \sim 79.4$  kW, 熱効率  $\eta_{th} = 29.4 \sim 31.3\%$  が得られている。

最大出力, 最高熱効率を得られた2点の各ステーションのデータをそれぞれ図9, 10に示す。冷却用補助空気

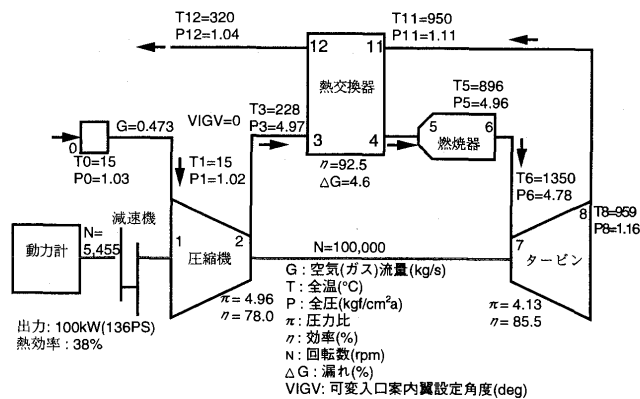


図6 各ステーション状態量 (定格点目標)

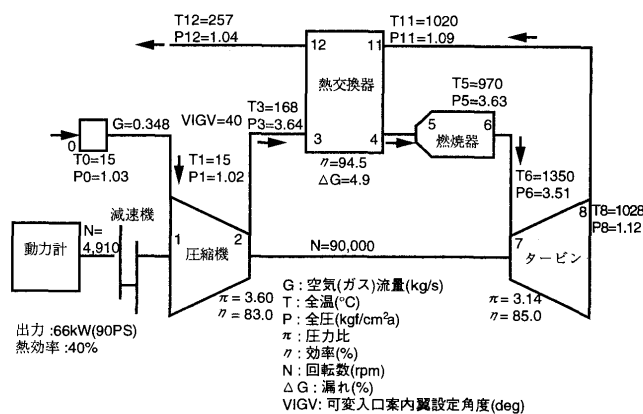


図7 各ステーション状態量 (9万 rpm, 最高熱効率点目標)

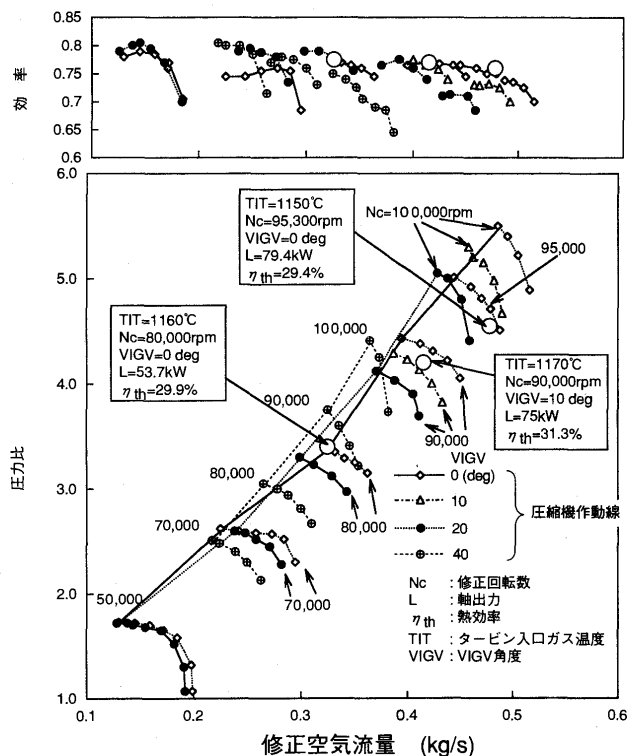


図8 圧縮機性能特性と作動点

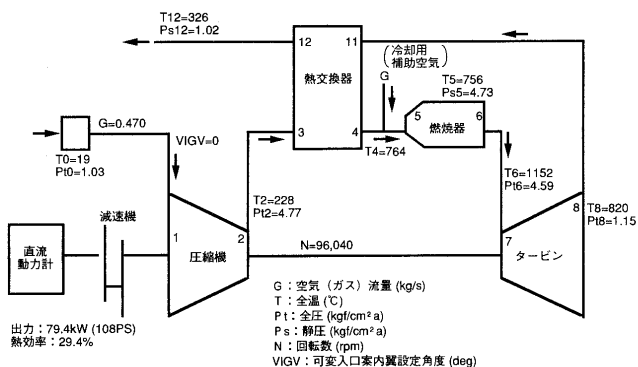


図 9 各ステーションの状態量 (現状最大出力点)

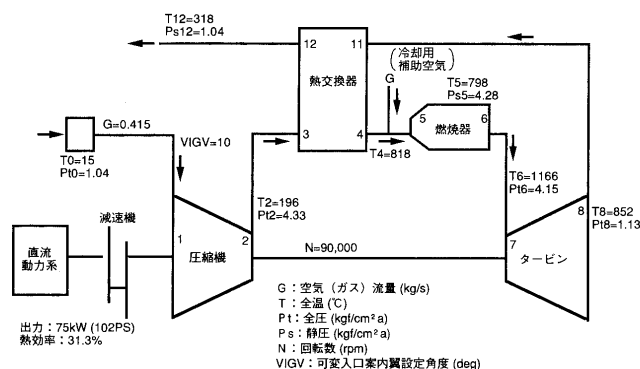


図 10 各ステーションの状態量 (現状最高熱効率点)

と大気温度の影響を補正すると、最大出力は 76.5 kW、最高熱効率は 31% である。ステーションデータを分析して、各要素性能を単体性能試験結果と対比し、出力および熱効率の向上見込みと各要素の性能向上の重点項目を定めた。

圧縮機の圧力比は目標値を達成しているが、効率が未達であり、特に VIGV の設定角度を増大させた条件での効率向上のための改良を進めている。また、開発初期には圧縮機性能が単体性能に対し、低下する問題があったが、高温部からの熱流入によるインペラ入口空気温度の上昇対策、ディフューザ取付面の熱変形対策、剛性増大による組立時の変形対策を実施し、解決した。

タービンはチップクリアランスを計画値より広く設定して組込んでおり、その影響を補正することにより単体性能試験と同等となる。最新設計タービンが単体性能試験で目標性能を達成しており、現在供試中のタービンとの性能比較を図 11 に示す。今後は最新設計タービンを組み込み、高温でのハウジングの変形挙動と変形吸収機構の信頼性を確認して、チップクリアランスを縮小し、性能向上を図る。

燃焼器は本試験においては主として、高負荷領域での作動となるため、プライマリ噴射弁の予蒸発予混合希薄燃焼とセカンダリ噴射弁の拡散燃焼との組合せ方式を採用している。燃料リッチ側の限界 (予蒸発管への逆火と保炎器下面へのカーボン堆積) に余裕が少ないことと熱損失が計画値より大きいこと、燃料リッチ側への作動域

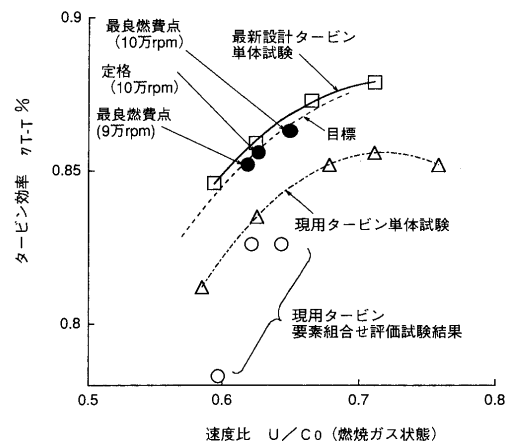


図 11 タービン効率特性

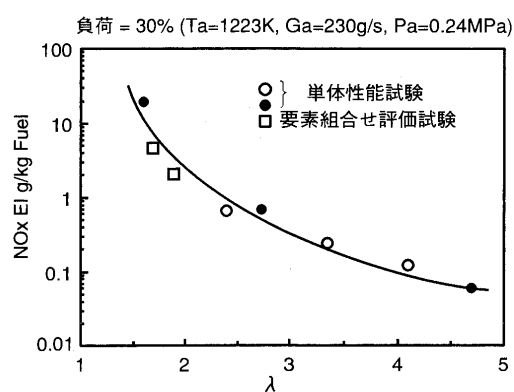


図 12 排ガス性能

拡大と高温セラミック構造部の遮熱対策による熱損失の低減を進めている。排気特性は動的な評価も含め、制御系を持つエンジン試験で実施するが、予備的な排気特性については本試験で図 12 に示すように、予蒸発予混合燃焼での NOx データが燃焼器単体試験での結果とほぼ一致することを確認し、空気過剰率  $\lambda = 2 \sim 3$  に制御することにより、目標適合の見込みである。

熱交換器の漏れの単体試験結果では、シール部漏れ (目標値 4.6~4.9%) にシールとハウジング間のプラットホームおよび金属ベローズ構造の取付け面からの漏れが加わるため、合計の漏れ目標値は 5.5~5.8% である。本試験での現状の漏れは目標値より 2~3% 多いが、図 13 に示す単体性能試験で目標を達成した最新設計シールを今後適用する。温度効率は Thick LAS (コルゲート成形、サイン波形通路) のコアを用い目標値レベルに達しているが、MAS (押出し成形、矩形通路) コアではさらに 1.4% 向上の見込みである。

高速軸/減速機の動力損失については図 14 に示すように、軸受外輪温度許容値に対し、余裕を持った運転をしているため、中間評価レベルに対し定格で 2.8 kW 程度増加しているが、潤滑条件の最適化と許容温度の見直しにより目標レベルへの低減を図る。潤滑油については PEC の耐熱性潤滑油グループの開発したペンターエリ



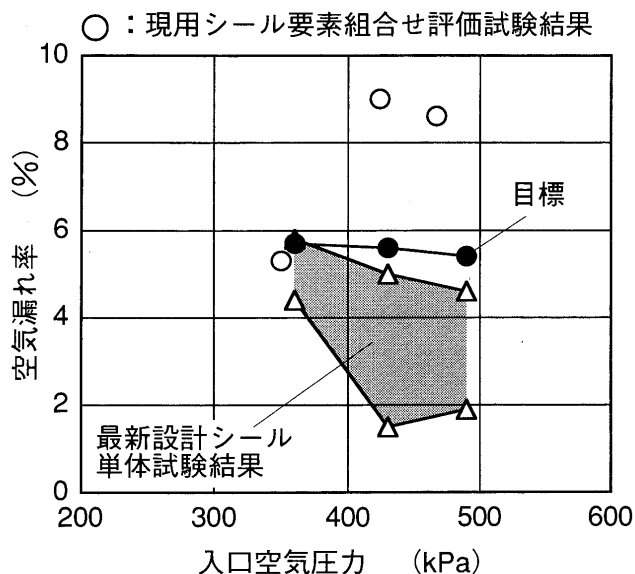


図 13 熱交換器空気漏れ特性

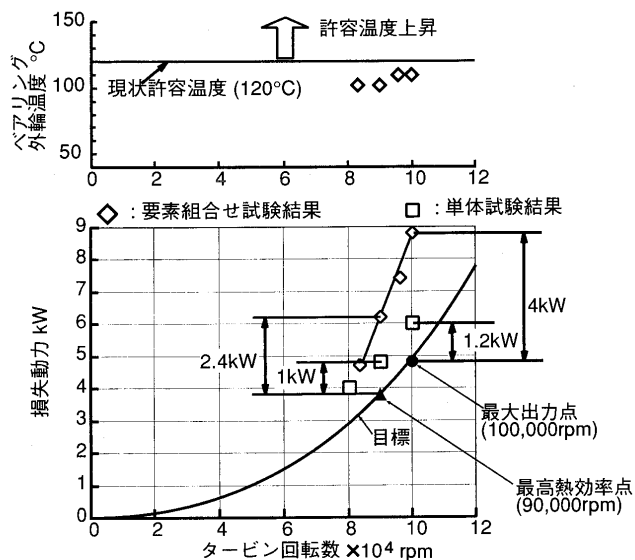


図 14 軸系/減速機動力損失

スリトールエステル系潤滑油を使用しており、試験終了後に使用油の分析を実施しているが、現在までに特に問題は生じていない。現在の軸受外輪温度の許容値 120°C を見直し、潤滑油供給量を低減することは可能と考えている。

### 5.3 性能向上予測

出力および熱効率の現状と今後の向上予測をそれぞれ図 15, 16 に示す。タービン、熱交換器は前述の通り単体性能試験で目標性能を達成しており、燃焼器も燃料リッチ側の作動域拡大対策が進んでおり、それら改良要素部品を組み込み評価する。出力、熱効率目標達成のために、圧縮機と燃焼器の改良を推進している。

## 6. 機能評価状況<sup>(4),(5)</sup>

各要素は専用の単体試験装置および組合せ試験装置に

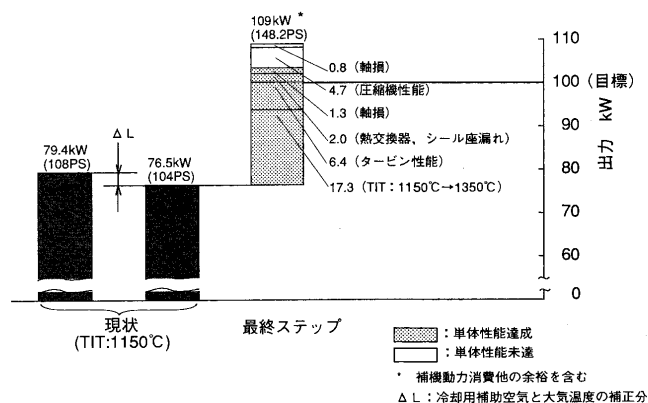


図 15 性能向上予測 (出力)

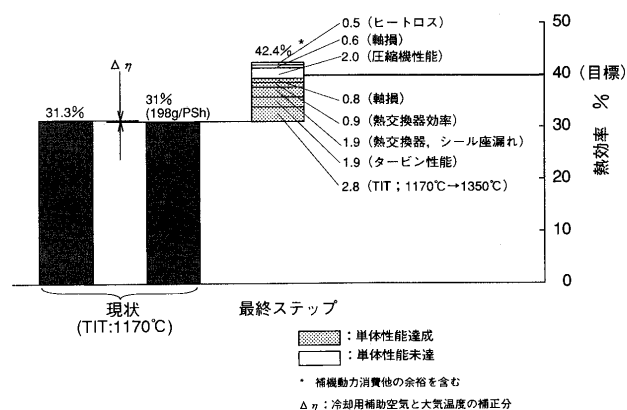


図 16 性能向上予測 (熱効率)

より、信頼性と耐久性の評価を実施しており、中間評価段階で TIT: 1200°C レベルの評価目標をクリアしている。本試験での確実な性能評価を進める上で、各要素の耐久試験は本試験装置へ組み込み適用するための必要条件である。各要素毎に TIT: 1350°C レベルで連続 100 時間 (起動停止条件が寿命を左右するものについては 200~250 サイクルを含む) を耐久目標としており、一部の要素を除いて約 50 時間の耐久実績を得ている。

本試験においても、燃焼器のリッチ化と遮熱対策を適用し、TIT: 1300°C レベルでの予備試験を実施した。TIT とともにタービン出口ガス温度が金属製のハウジング類の温度上昇と熱変形増大を招くことから、材料許容温度以下に管理できるか、また弾性的に変形を吸収する機能の健全性について確認した。図 17 に運転条件と各部温度の時間変化を示す。各金属部分は許容温度以内であり、分解後の点検でも変形吸収機構部品を含め異常はなく、TIT: 1350°C までの運転へ進む上で機能的問題はないものと考えている。但し、ハウジング断熱材には亀裂と破片の脱落がみられ、タービンロータの入口翼面のチッピングおよび熱交換器シールのダイアフラムに噛込み痕が発生しており、分解毎に補修をして使用している。図 18, 19 に示すように、従来は熱膨張と熱収縮が大きく低強度の成形体をペースト断熱材により塗込み固定していたが、表面をガラスコーティングした低熱膨張で高強度

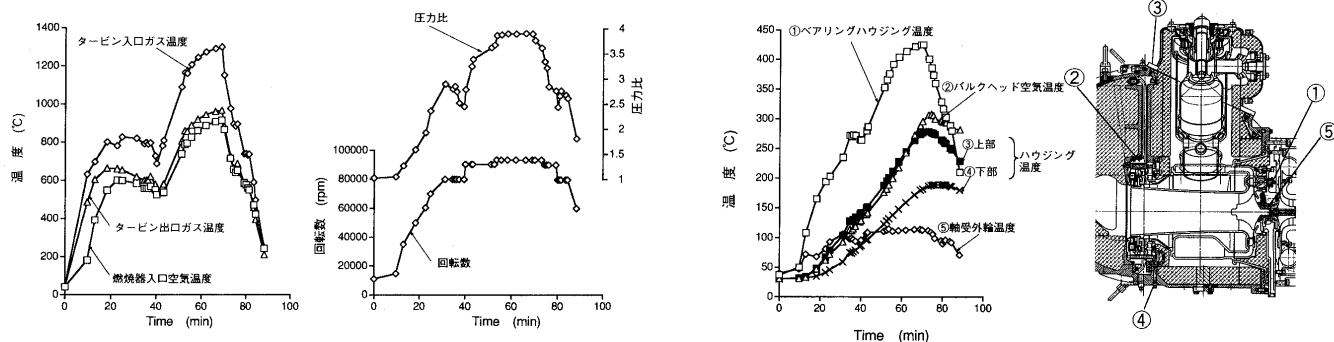


図 17 TIT: 1300°C 機能試験データ

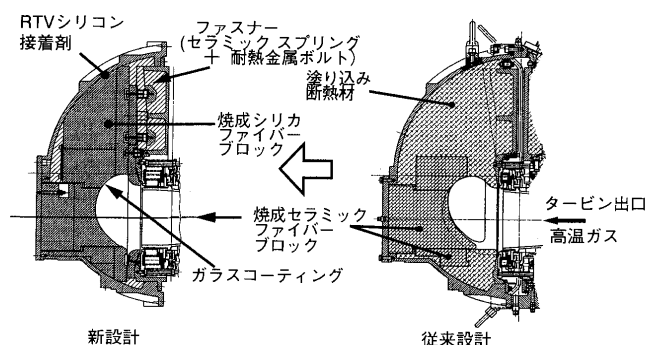
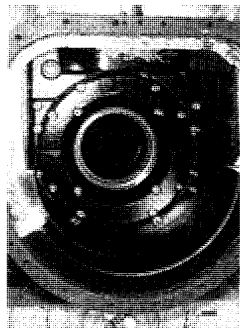
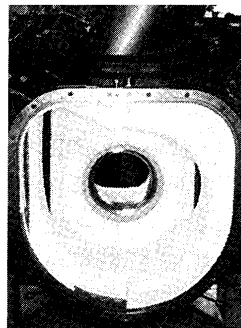


図 18 断熱材構造



新 (新成形断熱材のファスナー固定)



従来 (成形断熱材+塗り込み)

図 19 断熱材構造外観

の  $\text{SiO}_2$  ファイバー成形体を用い、高温部はセラミックパネと耐熱金属製ボルトで弾性的に支持し、低温部はシリコンゴム接着剤で固定する新設計断熱材での評価を実

施し、効果が確認されたので、今後の試験に適用する。

## 7. まとめ

- (1) TIT: 1150~1170°C で最大出力 76.5 kW (目標: 100 kW), 最高熱効率 31% (目標: 40%) を得た。単体性能試験で目標性能を達成したタービン, 熱交換器を組み込み, 圧縮機および燃焼器のさらなる改良を図ることにより, エンジン目標性能は達成の見込みである。
- (2) リッチ化燃焼器と 50 時間レベルの耐久評価した要素部品を組み込み, TIT: 1300°C レベルでの予備試験を実施し, 各部温度および機能面で問題のないことを確認した。但し, ハウジング断熱材の亀裂と破片の脱落がみられるため, 対策を図り, TIT: 1350°C の試験を準備中である。

## 謝 辞

本研究開発の実施にあたり, 御指導と御協力を頂いた PEC ならびに JARI の関係各位に対し, 深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) T. Nishiyama and et al.: ASME Paper 96-GT-36 (1996.6)
- (2) 中沢 他: 日本ガスタービン学会誌 Vol. 24 No. 94, 1996.9, 36-42
- (3) M. Muraki and et al: SAE Paper 962110 (1996.10)
- (4) 中沢 他: 日本ガスタービン学会誌 Vol. 24 No. 93, 1996.6, 84-91
- (5) N. Nakazawa and et al: ASME Paper 96-GT-366 (1996.6)

## 航空宇宙技術研究所における航空エンジン関連研究

佐々木 誠<sup>\*1</sup>,  
SASAKI Makoto森田 光男<sup>\*1</sup>  
MORITA Mitsuo

## 1. まえがき

科学技術庁航空宇宙技術研究所（航技研）における航空用ガスタービンエンジン関連研究の概要については、これまでに本紙 No. 10(1975年9月号), No. 30(1980年9月号), No. 31(1980年12月号) および No. 61(1988年6月号) に紹介させていただいた。本号では、組織の現状と前回報告以降の研究活動の概要について紹介したい。

## 2. 組織の現状

航技研における航空用ガスタービンエンジン関連研究は、現在、原動機部および熱流体力学部が担当している。原動機部は昭和30年の当所設立と同時に設置され、試験設備の整備を行うとともに、ジェットエンジン要素の研究を開始し、昭和38年以降は、要素研究の成果を適用しつつ、JR リフトジェットエンジン、FJR ターボファンエンジンなどの研究開発を推進してきた。昭和51年に航空エンジンの騒音、排ガス等の公害問題に対処するため、原動機部の一部を主体にして航空機公害グループが設置され、さらに昭和63年に数値解析、伝熱を含むエンジンに関する基礎的研究を担う熱流体力学部として再編された。図1に示すように、現在原動機部は9研究室、熱流体力学部は5研究室で構成され、定員は合せて53名である。この他に特別研究官1名、外部より、客員研究官14名、STA フェロー1名、科学技術特別研究員2名、技術研修生約40名が研究に参加している。

## 3. 研究活動の概要

研究活動は大別すると、経常研究費による基礎研究と、特別の予算による特別研究、プロジェクト研究、その他の重点的基礎・基盤研究に分けられる。

## 3.1 経常研究

各研究室が担当分野について経常的にを行っているもので、3年を目途に具体的な研究内容の見直しを行っている。現在の主な研究項目は次のとおりである。

〔原動機部関連〕 航空用推進システムの総合性能の研究、エンジン流体要素の研究、将来型ファン・圧縮機の基礎

## 原動機部

- 原動機総括室
- 圧縮機研究室
- タービン研究室
- 原動機空力研究室
- 燃焼器研究室
- 原動機材料構造研究室
- 原動機制御研究室
- 原動機性能研究室
- 原動機計測研究室

## 熱流体力学部

- 熱流体力学総括室
- 流体騒音研究室
- 反応流体研究室
- 数値熱流体研究室
- 伝熱研究室

図1 原動機部および熱流体力学部の組織構成

研究、航空機エンジンからのNO<sub>x</sub>排出低減に関する研究、タービン性能向上に関する研究、エンジン適応制御の研究、原動機部材の強度に関する研究、エンジン内部流の計測法の研究、超高バイパス比ファンの実験研究。

〔熱流体力学部関連〕 次世代推進システムの流体騒音に関する研究、高速ターボ機械の非定常流れの研究、噴霧流れ場における計測とシミュレーションに関する基礎的研究、推進システムの流体数値シミュレーションの研究、推進機関の超高温化に関する研究。

## 3.2 特別研究

航技研の大型航空宇宙特別研究として、所内関係各部の横断的研究の一環として次の研究を行っている。

## (1) 超高バイパス比可変形状エンジンの研究

[1987~1995]

高亜音速航空機の燃料消費率の大幅な低減、高速飛行性と低騒音を達成するため、バイパス比15~20程度の超高バイパス比可変形状エンジン概念について検討を行った。その結果から、各要素の目標性能を定め、最も重要な課題として低NO<sub>x</sub>燃焼器技術、革新的タービン冷却技術、エンジン制御技術ならびにダクトドファン技術を選定して基礎研究を進めた。研究の進展に伴い、研究課題をダクトドファンの3次元NS解析を全面的に活用した設計手法の開発と縮小模型による検証試験(図2)に集約し、基礎的なデータの蓄積を行って特別研究を終了した。今後は経常研究として改良設計ならびに検証試験を継続する。なお、本研究の過程で考案したコア分離型エンジンシステムを適用した高速VTOL機概念につき、機体を含めた技術的成立性、飛行特性、騒音特性の検討の結果、極めて有望との見通しを得た。

原稿受付 1997年1月20日

<sup>\*1</sup> 科学技術庁 航空宇宙技術研究所  
〒182 調布市深大寺東町7-44-1

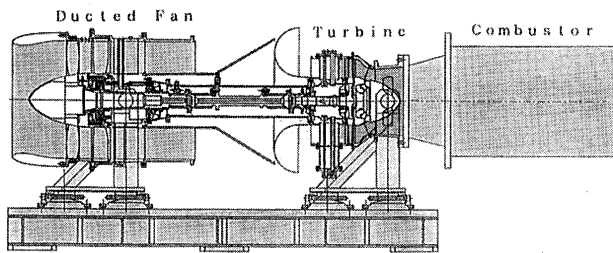


図2 超高バイパス比ダクトファン実証試験機

## (2) 高速エアブリージングエンジンの研究 [1987~]

将来の宇宙往還輸送システムであるスペースプレーンの研究の一環として、離陸からマッハ6程度までを作動範囲とするターボ系エアブリージングエンジンの技術確立のため、システム、要素、材料・構造に関する研究を行っている。水素燃料対向噴流型ラム燃焼器の高温燃焼試験、インテークと機体との統合設計データ取得を目的とした超音速風洞試験、C/C複合材のターボ要素への適用試作とその超高温回転強度試験等を行っている。

## (3) 高速航空機の推進技術に関する研究 [1995~]

次世代超音速輸送機の実現に向けて、航技研では重要要素技術の研究を進めるとともに、技術実証のための小型の実験機の開発と飛行実験を目指した特別研究を開始した。その一環として次のような推進技術に関する研究を行っている。[エンジンシステム]優れた経済性と環境適合性を有する目標エンジンの概念検討を行うとともに、エンジン運転制御法の研究を行う。設計マッハ数2~2.5の超音速インテークについて、可変インテークシステムの検討を行うとともに、性能改善のための基礎模型実験、超音速風洞試験を行っている。[低NO<sub>x</sub>燃焼器]離陸から超音速巡航にわたる広い作動範囲でNO<sub>x</sub>の排出を極小にする技術の確立を目指し、二重スワローと各種気流微粒化ノズルを組合わせたバーナの排出特性の評価を行っている。[低騒音高効率ノズル]少ない推力損失の下で騒音低減が可能なノズル技術の実証を目指して、エジェクター付きノズルの騒音試験を実施している。[高温高負荷ターボ要素]超高負荷で高効率な圧縮機、タービン、高温部材の高度な冷却技術を実現するための新概念を提示する。[エンジンCFD]インテークからノズルに至る全エンジン構成要素の数値解析プログラムの開発を目指して、多段翼列及びインテーク流れ解析コードの開発を行っている。[エンジン用超耐熱複合材]1300℃以上で使用可能な超耐熱複合材技術の確立のため、SiC繊維強化複合材の強度評価を進めている。

## (4) 航空エンジンの排気評価の研究 [1996~]

航空安全・環境適合技術の研究の一環として、巡航状態のエンジン排気中のNO<sub>x</sub>、炭化水素、粒状物質等の微量成分濃度を測定する技術確立し、低減目標の策定に必要なデータを取得するため、排気中のNO<sub>x</sub>濃度を非接触で測定することの可能な非分散赤外線吸収法による濃度測定装置の設計と予備試験に着手した。

## 3.3 通産省予算によるプロジェクト研究

## (1) 超音速輸送機用推進システムの研究開発 [通産省工業技術院産業科学技術研究開発, 1989~1998]

このプロジェクトは、低速から飛行マッハ5程度までの飛行を可能とし、燃費が良く、低騒音で排気による環境への影響の少ない超音速輸送機用推進システムの開発に必要な技術確立することを目標として、HYPR研究組合(我が国のジェットエンジン・メーカー3社で構成)、海外メーカー4社、および航技研を含む4国立研究機関の参加の下に進められており、その概要は本誌特集号(No.77, 1992.6)、国際シンポジウム等で度々紹介されてきている。

航技研は、プロジェクト目標達成のために定められた研究開発項目(ラムジェット、ターボジェット、計測制御、トータルシステム)のほぼ全てに関して先進的基礎的要素研究およびシステム総合研究を実施し、企業が進める研究開発に対しても必要に応じて共同研究を行うとともに、試作ターボジェットおよびコンバインドサイクルエンジンの設計・試作・運転試験等に対する技術協力をを行い、プロジェクトの推進に協力している。所内的には、原動機部、熱流体力学部の他に角田宇宙推進技術研究センターが研究を分担するとともに、風洞試験等に関して関係部の協力を得て進めている。図3はメタン燃料ラム燃焼器の高温燃焼試験状況、図4は翼端隙間のあるタービン翼列のCFD解析結果である。本研究開発における当所の最近の研究状況は文献(1)に紹介されている。

## (2) セラミックガスタービンの研究開発 [通産省工業技術院エネルギー・環境技術研究開発, 1988~1998]

このプロジェクトは、ガスタービンの高温部にセラミックスを適用して、42%以上の高い熱効率で、小型低公害、多種燃料適応可能な300kWクラスのコージェネレーション用再生サイクル・ガスタービンを実現することを目指して、ガスタービン・メーカー、セラミック材料メーカー、ならびに航技研を含む国立研究機関等の参加の下に研究開発が進められており、その概要については本誌特集号(No.67, 1989.12およびNo.87, 1994.12)等で紹介されてきている。

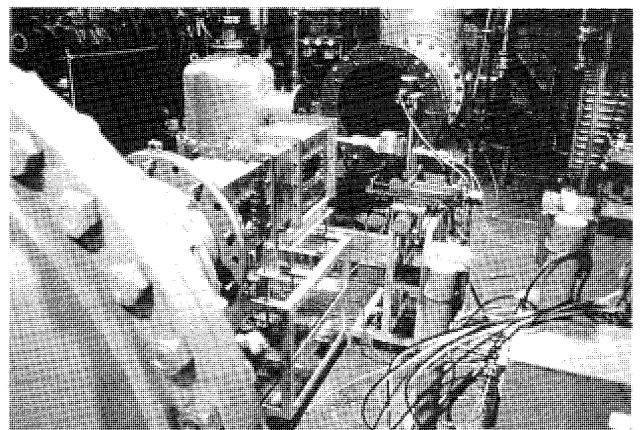


図3 ラム燃焼器高温燃焼試験

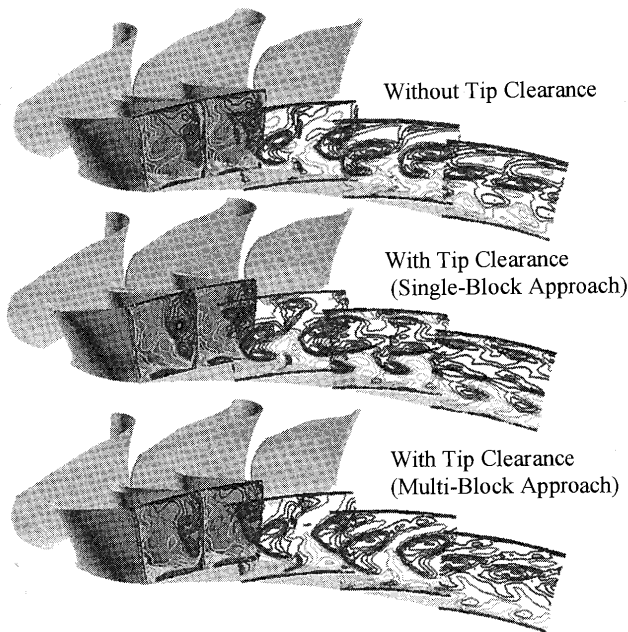


図4 翼端隙間のあるタービン翼列のCFD解析例

航技研は、本プロジェクトの推進に協力するとともに、セラミックガスタービンの要素技術および高効率化技術に関して次のような研究を行っている: エンジン・ダイナミックシミュレーションおよびダイナミクスの同定法の研究, CFDによる圧縮機空力設計法の研究, NO<sub>x</sub>評価技術と低NO<sub>x</sub>燃焼器の研究, セラミックス製小型・高性能熱交換器の研究, ハイブリッド・セラミックス製玉軸受の研究, 非金属タービン動翼の翼端すきま計測法の研究, セラミックス材料評価技術の研究。これらの研究成果の概要は文献(2)に紹介されている。

### 3.4 その他の重点基礎・基盤研究

環境庁国立機関公害防止等試験研究として、「超短縮火炎燃焼法による高温ガスタービンからの窒素酸化物排出低減の研究」および「アクティブ・ノイズ・コントロールによるファン・送風機等の低騒音化の研究」を実施している。また科学技術振興調整費による重点基礎研究として、「超音波翼端すきま計測の研究」および「ナビエーストックス方程式の高精度新解法—MR法の研究」を実施している。このほか航空機によるエンジン排出ガスと大気移動速度の計測に関する研究を実施している。

## 4. 研究設備

前項の特別研究やプロジェクト研究の推進のため、比較的最近導入・更新された研究設備として、ラムジェット要素試験用空気源設備 (0.7 MPa, 12 kg/s) および空気加熱器 (1270 K, 図5), 超音速ジェット騒音試験設備 (図6), 高温高速回転試験設備などがある。

次世代超音速機用エンジン等の新型エンジンおよびその構成要素の高空性能やエンジン排気の高空環境適合性の試験研究に必要な基盤設備の設計を進めている。

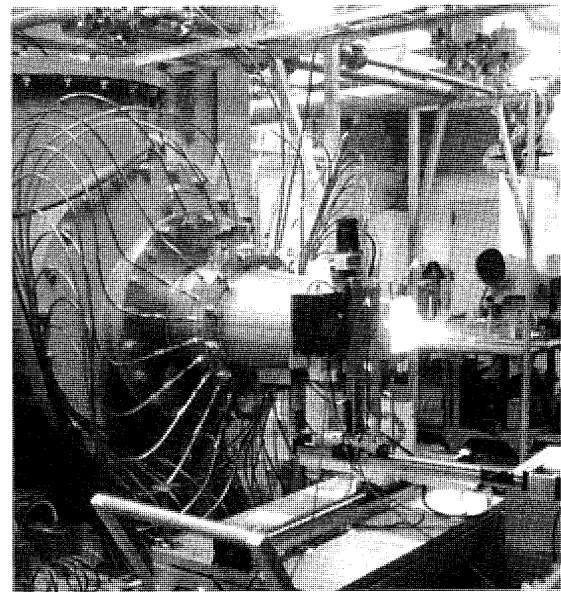


図5 高温燃焼試験用空気加熱器

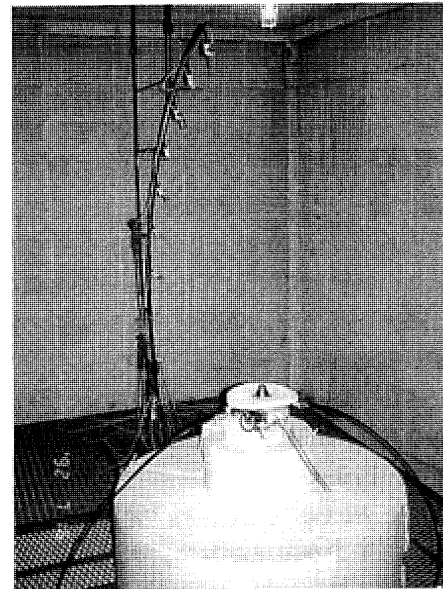


図6 超音速ジェット騒音試験設備

## 5. あとがき

研究の推進にあたり、東京大学、東京理科大学、宇宙科学研究所、HYPR研究組合、国内エンジン関連企業、ドイツ航空宇宙研究所 (DLR) ほか多数の外部機関と共同研究を行うとともに、客員研究官、技術研修生などとして多くの外部関係者のご参加を得ていることを記して、感謝の意を表する。

## 参考文献

- (1) 柳良二, 森田光男, 航技研における HYPR 研究の概要, 第34回飛行機シンポジウム (1996.10).
- (2) 能瀬弘幸, 航技研におけるセラミックガスタービンの研究, ガスタービン秋季講演会 (松江, 1994.10).

## 第3回内部流の実験及び計算空気熱力学国際会議

水木 新平\*<sup>1</sup>,  
MIZUKI Shinpei

小川 明\*<sup>2</sup>  
OGAWA Akira

### 1. 会議沿革

内部流れの研究は、航空宇宙工学の急速な進歩並びにエネルギー変換工学、化学工学、環境及び生物科学の進歩に伴い、その重要性を増してきた。複雑な構造内部の熱流体解析には、新しい計測技術を用いた測定法及び数値計算の進歩が必要となつた。ISAIF (International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows) は、そうした熱流体内部流れの研究結果を、発表と討論を通して、研究技術者間に提供し、相互の発展を促す目的で、中国の呼びかけから初めて実現した。従って、1回おきに中国に戻り開催される習わしとなっている。中国での主催者は、中国科学院工程熱物理研究所である。同研究所の歴史は、遡り1956年に故WU ChungHua (呉仲華) 教授により設立され、1980年に現在の200人を超える研究者を擁する研究組織になった。呉仲華教授については、有名なS1-S2流面理論の創始者としてばかりでなく、ガスタービン学会の特別講演でお目にかかった会員も多いと推察する。同研究所では、現在も、WU理論の伝統を引く良い研究が実施されている。

第1回ISAIFは、こうして、その所長、陳乃興教授 (Prof. Chen NaiXing) を会長に、1990年7月8日～12日、北京市内、Friendship Hotelの科技講演会堂で開催された。このときの参加国は、旧ソ連邦、カナダ、イタリア、韓国、ブラジル、イギリス、アメリカ、ドイツ、チェコ、インド、フランス、ベルギー、日本等であり、発表論文数は、109件であった。特に、旧ソ連邦から16件の論文発表があつたが、これについては、中国と旧ソ連邦との間で相互協定があり、中国の開催の場合、旧ソ連邦からの参加者に優遇招待があつたと聞く。

第2回ISAIFは、チェコ国プラハにあるInstitute of Thermomechanics, Academy of Scienceが主催者となり、会長はDr. Rudolf DVORAKで、1993年7月12日～15日、プラハ市外のホテルで行われた。参加国は、中国、フランス、ロシア、ドイツ、ポーランド、ベルギー、アメリカ、日本、ウクライナ、ギリシャ、カナダ、イタリア、インド、イギリス等であり、発表論文は87件であり、その内、中国が12件、ロシアが7件であった。

### 2. 第3回ISAIF

#### 開催次第

再び北京に舞台を戻し、中国科学院工程熱物理研究所 (所長、陳静宜教授—Prof. CHEN Jin Gyi) が主催者となり、会長に陳乃興教授、また世話人 (Secretary) は余申教授—Prof. YU Shenが中心となり、北京市内、中国科技会堂 (China Hall of Science and Technology—CHST) にて、1996年9月1日～6日まで開催された。参加は19ヶ国におよび、その内訳は中国 (35) (台湾 (3) を含む) をはじめフランス (14)、ロシア (11)、日本 (11)、ドイツ (10)、韓国 (7)、インド (7)、ベルギー (5)、ウクライナ (5)、ポーランド (5)、イギリス (4)、チェコ (3)、カナダ (2)、アルジェリア (2)、アメリカ (1)、ルーマニア (1)、マレーシア (1)、オランダ (1)、ギリシャ (1) であった。ここで、( ) 内の数は発表論文数を示しており、参加者の総数は全体で130名程であった。

1日(日)は参加登録とInternational CommitteeとOrganizing CommitteeのJoint Meetingが行なわれた。

2日(月)に開会式が行われ、会長の陳乃興教授による開会の辞に続き、陳静宜所長の歓迎の辞が述べられた。この後、数名の海外からの参加者の式辞に続き、余申教授により組織委員会報告がなされた。コーヒープレイクと昼食をはさみ、基調講演 (Keynote Lecture Session I, II) が行われた。

#### 講演

発表内容については、紙面の制約から、以下のプログラムタイトルより推察願いたい。テーマや対象は、回転機械や航空推進機、乱流や混相流という風に、広い範囲に及ぶ。勿論、すべて熱流体に関連するものである。

#### ●基調講演セッション

- Denton, J. D.: 'Lessons from Rotor 37'
- Zhong, F. Y.: 'Studies on the Aeroacoustics of Turbomachinery'
- Nagashima, T.: 'Modern vs Classical Studying Methods of Fuel Gas Injection into Supersonic Airstream'
- Bousgarbics, J. L., Brizzi, L. E., Foucault, E.: 'Coherent Structures Generated by a Circular Jet Issuing into a Cross Laminar Boundary Layer'

原稿受付 1996年11月6日

\*1 法政大学工学部

\*2 日本大学工学部



- Gal-Or, B.: 'Civilizing Military Thrust Vectoring Flight Control to Maximize Transport Jets Flight Safety'
- Schnerr, G. H., Adam, S.: 'Visualization of Unsteady Gas/Vapor Expansion Flows'

#### ●一般セッション

- 3日(火)・Flow in centrifugal fans and compressors
- Flow in turbines (I)
  - Computational fluid dynamics (I)
  - Unsteady flow, aerodynamic acoustics
  - Flow in turbines (II)
  - Wall jet and impinging jet
- 4日(水)・Flow in axial fans and compressors
- Transonic flow, shock wave boundary layer interaction
  - Multi-phase flows and flow with chemical reaction (I)
  - Computational fluid dynamics (II)
  - Boundary layer flow, wake, vortices, transition, and flow around obstacles
  - Multi-phase flows and flow with chemical reaction (II)
- 6日(金)・Flow with heat and mass transfer
- Flow in intakes, nozzles, channels and pipes
  - Stall, surge and stability

各セッションで論文の発表は講演20分、質疑10分の合計30分で取り行われた。論文総数は126編で内20編は国際共同研究であり、中国の共同研究は8編で、中国以外の共同研究も12編あった。日本からの参加者(敬称略)は、筆者らの他に、長島(東大)、山口(東大)、杉山(山形大)、黒田(防衛大)、千葉(運輸省)、持丸(東工大)、小松原(法大)の7名が出席したが、論文の連名者も含めると22名にのぼった。

#### その他の行事

2日(月)はCHSTのBanquet Hallでレセプションが開かれた。その他、会議期間中はSessionの間のCoffee Breakは15分、昼食はCHSTの傍のレストランYu-Banでビュッフェスタイルの食事が提供された。但し、最終日は参加者が飽きてきたので特別にCHSTのBanquet Hallで中国料理が用意された。

3日(火)の講演終了後には朝陽劇場にバス2台を連ねて出かけ、雑技(サーカス)を楽しく見学した。

4日(水)には2回目のInternational CommitteeとOrganizing Committeeの会合が行われ、次回のISAIFの開催地や会議のあり方などが討議された。

5日(木)は朝7:30より参加者と同伴者約80名程がバス

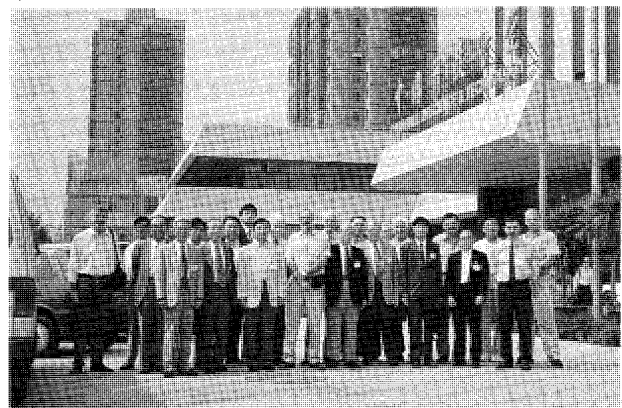
2台で万里の長城(八達嶺)と明陵の見物に出かけた。途中、交通渋滞に逢ったが全員で非常に楽しい一日を過ごし、参加者同士、打ちとけることができた。

6日(金)午後は、希望者グループが陳静宜所長の案内の下、中国科学院工程熱物理研究所を見学した。大型回転試験機など一部に運転休止が見られたが、活気ある研究現場で議論することもできた。夕方には、北海公園内の御膳堂でBanquetが催された。BanquetではカナダのProf. Y. GagnonがChairmanとしてアイデアをふるい、参加者への次回のISAIFの案内、Prof. Gal-Or夫人の誕生祝いのケーキ、伝統音楽を伴奏に王朝衣装の歌手による歌、加えて各国参加者の歌合戦など、大いに盛り上がりを見せ、参加者全員は和気あいの雰囲気の中で明時代の宮廷料理を楽しみ、次回での再会を誓って別れた。

### 3. 会議の今後

会期中のInternational CommitteeとOrganizing Committeeによる会合において、次回の開催期間と開催地について討議が行われ、第4回ISAIFは1999年の8月中旬を目標にドイツのDresden大学で行うことが満場一致で決定された。さらに、International CommitteeとOrganizing Committeeメンバー間の連絡はe-mailを用いること、また、会議参加予定者は必ず講演する事、論文を受理され印刷された場合に欠席しない事など、国際会議で時々生ずる問題点などについての議論も行われた。さらに、会議の開催期間についても、長過ぎずに3日間程度で終了するように努力することが了承された。

会議全体を総括すると、Keynote Lectureから各セッションまで滞りなく行われたが、Excursion等の催物も含めて、特にOrganizing Committeeが用意周到であった。余申教授による会議全搬にわたる献身的な努力、また、会長の陳乃興教授をはじめ数多くの中国側関係者の熱意が強く感じられた。今後の会議の発展を祈念したい。



3rd ISAIF 於 中国科技会堂

## 「新世代航空機用エンジンの研究開発」 国際協力推進海外調査の報告

森田 光男\*<sup>1</sup>  
MORITA Mitsuo

JETRO 主催のこの調査団は、東大の梶教授を団長とし、1996年11月10日から11月23日までの約2週間、欧州3カ国、米国の計4カ国6個所の航空宇宙研究所、航空エンジンメーカを訪問し意見交換を行ったものである。

11月10日ルフトハンザ LH-711 便は13時間という気の遠くなる様なフライトの末（これは序の口であったが）、ようやくフランクフルト空港に着陸した。この日は、もう一便乗り継いで、デュッセルドルフ泊。翌11日はドイツの航空宇宙技術研究所である DLR 訪問であり、折からの小雨の中、我々の乗った貸切バスは小1時間アウトバーンを走ってケルン郊外にある DLR に到着した。

研究所は彼らの云うオークの木立に囲まれて研究棟がまばらに立った欧州独特のうらやましい研究環境である。

午前中は日独とも、燃焼と排気公害、低騒音、設計技術のコンピュータ化など研究状況を交換した。DLR の CFD 発表は、Karl Engel 君が1996年4月から約5カ月航技研に滞在して行ったタービンの段間解析の結果をビデオに落とし、ウエークの翼間流れの様子をきれいに可視化していた。後で彼に誘われ居室を訪れたが、コンピュータに囲まれ1部屋を同僚と2人でシェアしていた。また航空エンジンの排気公害に関しては、SST は成層圏を巡航するためオゾン層に対する影響が大きい、NO<sub>x</sub> EI を5以下に押さえても影響は避けられないのではないかと排気公害に対する懸念の表明もあり、ドイツの公害に対する強い姿勢が窺える。

午後は研究設備を見学した。LIF (Laser Induced Fluorescent) を装備した燃焼器の2次元リグには軸方向にステージングした低公害燃焼器の模型が載っており、BR 700 関連とのことであった。もう一つは例の MTU の KRISP ファンの空力リグである。これは、現在では空力特性の試験と言うよりは、むしろ CFD 検証に使用されており、LDV (Laser Doppler Velocimeter) の計測を行っていた。ドイツは日本と同じく武器輸出の禁止を経験した影響か、あるいはデタント、東西ドイツの統一の影響かわからぬが、研究活動はほとんど地味な感じであった。

明けて12日は懐かしのパリに移動した。この夜は航技研で約6カ月研修した2人のフランスのお嬢さん (Marie と Sandra) と Marie の友人、もう1人、今は SNECMA に勤めている元航技研研修生の Bruno 君と

その奥さんの5人で歓迎会を開いてくれた。昔話や近況を語りあい楽しい一時を過ごせたのは今回の旅の大きな喜びの一つである。

13日は ONERA のシャティオン本部を訪問した。ここは22年前、筆者が6カ月滞在していた所で、昔懐かしい人々と再会し旧交を暖めることができた。

会議では日本、ONERA 相互の研究状況の情報交換を行った。ここはデタントの影響を感じなかった研究所の一つである。航空宇宙にけるフランス政府の意気込みが感じられる。これはフランス最の筆者だけの思い込みであろうか。またドイツと異なり、SST に対しても関心が高い印象であった。午後はパレイゾにある研究設備を見学した。ここは約120年前に作られた半地下要塞であるが、筆者が居た頃は、迷路のような地下壕兵舎を利用して各種試験装置が設置してあったが、現在は、1991年建造と銘の入った新しいビルに移転していた。CARS (Coherent Anti Stokes Raman Spectroscopy) は2重壁の部屋に収められており、光軸固定で供試燃焼器の方が移動する構造になっていて、2次元燃焼器モデルがセットアップされていた。予混合予蒸発希薄 (LPP) 燃焼の基礎データとして、自己着火遅れ時間の試験などをしていた。

材料研究棟では CMC の製造工程研究で、スプレー塗布、あるいはろ過含浸プロセスなどの研究、電子ビームによる合金溶解技術など、実用化を前提にしたか、或はその一步手前の研究が目立った。

22年前と比べシャティオン、パレイゾとも綺麗になっており、設備も充実されてきている。それに比べ、我が航技研のエンジン設備は益々老朽化が進むばかりで、改めて日本の国研の現状を考えさせられた。

ONERA には、ここパレイゾを含め、全仏8ヶ所に研究設備があり、その中には日本の HYPR プロジェクトでインテークの試験を実施しているモダヌヌの風洞群がある。この他に軍の設備である推進試験センター CEPr に無響風洞を持っており、そこでも HYPR のエジェクタノイズの騒音試験を行う予定である。

翌14日は、代表的航空エンジンメーカの SNECMA 社、パリの南南東、車で約1時間のヴィラロッシュ工場を訪問した。SNECMA も HYPR プロジェクトに参加しており、日ごろ顔なじみの Dubois さん、Bruno 君が笑顔で出迎えてくれた。SNECMA からはミッドファンコンセプトを中心に研究開発状況の説明があった。

午後は工場の見学で、5,000 kW の高圧圧縮機のリグ

原稿受付 1997年1月10日

\* 1 科学技術庁 航空宇宙技術研究所  
〒182 調布市深大寺東町7-44-1



試験装置を見学した。設備は立派で、特に感心したのは配管/計測を上方に誘導してリグの横の部分のアクセスを十分に確保している事である。我々を含め 20 名ほどがリグのすぐ横で見学できるだけの十分なスペースがあった。

17 時頃に北駅から英仏海峡をユーロスターで横断、夕方ワートルロー駅についた。もう数日遅れていたら、ユーロトンネル火災にあうところであった。

15 日に英国防衛技術研究所 DRA を訪問、ここは軍の研究機関であり航空ショーで有名なファーンボロの空軍基地の広大な土地の一角にある。

DRA は、彼等が世界一と云う大型無響室を借用して HYPR のミキサージェクターノズルのジェット騒音試験を行った所でもある、その昔は FJR 710 エンジンの高空性能試験が 3 回行なわれた所で、当時は NGTE と呼ばれていた。筆者も高空着氷試験に立ち会い、後で「航空と公害」に紀行文を書いたことを思い出した。

DRA 側は燃焼から、システム、CFD まで盛りだくさんの発表があり非常に有益であった。午後は設備の見学で、戦前からターボジェットの開発を進めてきたお国柄、全般に設備は古い、その規模は巨大で、先に紹介した無響室や、今回見学した燃焼リグなども大型である。ここは唯一レーザ計測のない燃焼試験設備であり、大型設備を活かして、水冷プローブにより必要なデータを取得する事が出来るそうである。DRA の研究は軍のためと明確に云い切っていたのが印象的である。

明けて 16 日は、ロンドンヒースローから、ワシントン D. C. 経由でボストンに移動する予定であったが、ワシントンでエンジンからのオイル洩れにあい、ボストン到着時には日付が変わってしまっていた。大西洋線、国内線と禁煙フライトの続いたこの日、日頃ヘビースモーカーの筆者は機内で、やけの如く OH をアオッて熟睡してしまった。ボストンで着陸体勢に入った時、座席を戻せとスチュワードに肩を叩かれた程である。合計何時間眠ったのか本人にも判らない、そのせいで、時差調整にすっかり失敗してしまいボストンのホテルでは殆ど一睡も出来なかった。翌日(当日か)は日曜日で、半日ボストンの町をぶらつき、午後にはバスでコネチカット州の州都ハートフォード市に移動し、翌 18 日には P & W 社を訪問した。

P & W 社も HYPR プロジェクトに参加しており、川崎重工業と共同してラム燃焼器部を担当している。そのせいか非常に大切に我々を迎えてくれた。会議は同社執行副社長 E. Leduc 氏の「次世代 SST は 10~15 年先に実現するであろう、しかし開発コストが膨大で、市場規模もそう大きくはない。ぜひ世界の共同開発プロジェクトとしたい」との挨拶で始まり、NASA の HSRP を主体にして、研究開発ターゲット毎に充実した発表がありずいぶん参考になった。一方、どこも日本の新材料研究には興味があるらしく、AMG の弘松専務は、説明に追いつかれていた。この日は、午後 5 時まで議論が続き、最後に「P & W は今後も日本のプロジェクトに参加を希望

する」との発言で閉幕となった。

翌 19 日は P & W 社の見学で、PW 4000 シリーズがずっと並んでいるカスタマー・トレーニングセンターから始まり、研究センターの燃焼リグを見学した。燃焼リグには陸用ガスタービンの LPP 燃焼器が載っており、水素トーチで強制的にフラッシュバックを起こさせて回復能力の試験をしているとのことであった。

午後は、ミドルタウンの組立工場の見学で、やはり PW 4000 シリーズ、JT 9 D、F 100 などの組み立て、完成試験設備を見学した。数から言えば PW 4000 が圧倒的に多い。出荷試験のセルは 10 基ほど並んでおり、前室組立場から天井クレーンに吊られた大型ファンエンジンがするするとセルインする様は圧巻である。量産セルは我々の使っている開発セルに比べ計装は簡単で少ないが、逆にエンジンの搬入/搬出、扉の開閉などに周到的配慮が見られる。面白かったのは前室のごみ箱で(袋と言った方が適切、ロート状の布袋がスタンドから吊るしてある)、オレンジ色で、FOD 防止工具と記されていた。

20 日は最後の訪問地 NASA-Lewis Research Center のあるクリーブランドに移動した。翌日は予定通り NASA を訪問したが、ONERA 同様に入門のチェックがやたら厳重なだけで技術流出に対する配慮からか先方の説明は表面的で得るものはあまり無かった様に思う。ただ NASA、米国の航空宇宙戦略の一端を垣間見た感がある。その夜は五島みどりのバイオリンコンサートの初日で、幸いな事にメインフロアの良い席が \$43 で手に入り柳君、IHI の近田部長、機技研の吉岡さんと 4 人でクリーブランドオーケストラを満喫することが出来た、今回の調査旅行最後の日にふさわしい夜となった。

翌 21 日、約 20 時間にも及ぶ、禁煙に備えて、ボストンで手に入れた Nicotrol を腕にはり、機中の人となった。

以上が、今回の調査団の顛末であるが、各国ともデタント後の航空宇宙研究開発のスローダウンに悩みながらも、各研究機関は大型試験設備の維持/管理、自国の航空産業との契約に基づく開発試験、あるいは自己資金での基礎研究を通じて、それぞれ自国メーカのバックアップに勢力を注いでいる。また大学の先端研究と企業ニーズとの間のギャップを埋めるためのツールの開発など熱心に研究を行っているのが印象的である。

米国の航空宇宙産業は、自動車、コンピュータ産業と並んで自国製造業の最後の砦であり、欧州においても、英国、フランスなど自国の経済状況から制約はあるにしても、依然として航空宇宙産業の維持発展に力を注いでいる。

一方、日本の研究開発状況は、その質の高さは世界的に引けを取らないものの、規模の点でもう一步の感が残るのは人的リソース、研究開発設備整備の遅れの故か。

今回の各国訪問は、あらためて日本の航空産業の行く末、航技研の将来の在り方など色々考えさせられた旅であった。なお、調査結果の詳細は JETRO より刊行予定の調査報告書をご参照されたい。

## ASME ターボアジア '96

岡村 隆成\*<sup>1</sup>

OKAMURA Takanari

アジアで初めて ASME TURB ASIA '96 が、インドネシアのジャカルタで 1996 年 11 月 5 日から 7 日までの 3 日間開催された。会場は市街の中心地にあるコンベンションセンターで、ASME が宿泊ホテルとして幹旋した民族色豊かな Hilton hotel に隣接しており、行き来に極めて便利な場所である。通常の ASME TURBO EXPO は米国と欧州で毎年交互に開催されているが、ASME TURBO ASIA はこれとは別にアジアでのみ開催される。この学会に出席する機会があったので、参加したセッションや展示の様子などについて概要を述べる。

今、アジアは世界経済の中で最も活発な地域であり、この地域での学会の開催は、高い経済成長を支える電力需要に対応した発電設備や航空エンジンのアジア市場を睨んだものである。開会でのインドネシア側のスピーチで、自国での航空エンジン開発計画を披露しており、国を挙げての科学技術振興に意気が高い印象を受けた。

セッションは大別して技術的内容とユーザに対する教育やトレーニングそして補修に関する内容から成り、ユーザの立場にかなりウエイトを懸けたセッション構成となっている。論文数は 60 件で、国別では、米国、欧州からが殆どで、アジア勢は、台湾 3 件、日本、中国、韓国各 2 件、ニュージーランド 1 件で、地元インドネシアを初めとした東南アジア諸国からの発表はなかった。10 セッションに別れた発表と、11 のパネルセッションが行われた。

その中で、ABB の大型ガスタービン GT 13 E や GT 13 E 2 の運転実績や Siemens の最新鋭機 V 84.3 A の工場試験結果の発表と平行して、中小型機のコージェネやコンバインドサイクルへの適用に関する発表が行われた。例えば、ABB は単機容量 25 MW 級の GT 10 B ガスタービンを使った 35 MW 級の一軸型コンバインドサイクルを紹介していた。HRSG は縦型でガスタービンの排気プレナム上部に設けられた省スペース型のコンパクト設計である。また、50 MW 級の GT 8 C ガスタービンを使った一軸型コンバインドサイクルのタイでの実績を報告しており、中型機のプラント適用をアピールしていた。その背景としては、セッションの中でも大型対中小型ガスタービンの運用や経済性がテーマとして取り上げ

られている。大型ガスタービン/コンバインドサイクルは急速な電力需要への対応に適用される一方、中小型ガスタービンはコージェネやコンバインドサイクルとして、新興工業地域や地方での電力、蒸気供給用として使い分けされている。

次世代の石炭を燃料とする IGCC、PFBC プラントの運転実績や計画について、WH、ABB、GE 各社の状況が報告された。WH は Tidd PFBC プラントの実証を踏まえて、Sierra Pacific の Pinon Pine 95 MW プラントで、石炭 800 T/D の IGCC 空気吹きガス化炉にセラミックフィルターを世界最初に組み込み、1996 年末から運転を開始した。PFBC の実証プラント数は少ないが、ABB Carbon はその中で一番多くの実績を持っており、プラントの運転実績や計画と共にタービン翼の運転中のエロージョンや振動トラブル対策についても述べられた。材木のチップ等のバイオマス燃料に関しては、石炭燃料と併用することで単独使用に比べて経済性に優れているとしている。バイオマス燃料はここ数年、ガスタービン燃料として検討されるようになって来た。

一方、GE は、IGCC プラントの実績と今後の建設計画を示し、IGCC は 2000 年には PFBC の熱効率を超え、次世代 H 型ガスタービンの採用で高効率化を図って、発電単価は石炭焚き火力と並ぶとしている。ガス化燃料に 2% の天然ガス燃料を追加することで、IGCC の出力を 20% 以上増加することができ、例えば、H 型の 1 軸型 IGCC で出力は 550 MW に出力アップされ、熱効率は 50% (LHV 基準) に達する。

タービン翼の伝熱や空力関係のセッションでは、日本からは農工大のサーペンタイン通路の回転試験による 500 点近い多数計測の詳細な伝熱特性の把握と岩手大のタービン翼の二次流れ損失低減法に関する報告があった。また、傾斜リブを持ったサーペンタイン通路流れを解析コード FLUENT で数種の乱流モデルを使って解析し、実験との比較を行っている。その結果、熱伝達率や圧損はリブの有無や外向き/内向き流れによって、乱流モデルの影響を大きく受けることを明らかにしている。また、後縁吹き出しのあるタービン静翼の流れ解析と実験との比較も行われている。最近、このような複雑な内部流れや吹き出し流れの解析が盛んに行われており、乱流モデルやグリッドの評価、検討が進められている。

展示会場は、従来の ASME の展示に比べて規模は小さい。米国からの展示ブース数は約 1/3 程度と最も多い。

原稿受付 1997 年 1 月 10 日

\* 1 (株)東芝 重電技術研究所

〒230 横浜市鶴見区三ツ沢下町 2-4

続いてオランダと英国を合わせて約1/3であり、この2国は元宗主国として、今も現地に深く食い込んでいることが窺われる。日本からの展示ブースは全く見当たらなかった。アジアでビジネスを行い、今後も有力な市場として注目されているにも拘わらず、欧米と東南アジア地域のメーカのみで会場が構成されていることに寂しさを感じた。日本はビジネスには熱心だが、学会活動（当然、ビジネスに直結していると思われるが）には余り積極的ではないと言われそう。展示ブースで大きなスペースを取って目を引くのは、GE, ABB, KWU の3社である。GE は FA, H 型ガスタービンと IGCC の実績、建設計画のパネルの展示が主体であり、ABB は PFBC のパネルと GT 10 B ガスタービンモデルと低 NO<sub>x</sub> EV パーナの実物を展示していた。実機ガスタービンや最新タービン冷却翼等の実物の展示はほとんど見られない。一方、タービン翼や圧縮機翼の補修を行うシンガポール辺りの補修メーカの展示が目付いた。

興味を引いた展示ブースとしては、P & W とウクライナの Paton が折半の出資で1993年に設立した Pratt & Whitney-Paton はコーティング材と施工および装置を販売している。第二世代の EB-PVD (電子ビーム物理蒸着法) による遮熱コーティングは、従来の第一世代に比べてボンドコートの緻密性による耐酸化性、セラミックコートの熱サイクル特性の向上と耐コロージョン、エロージョン性向上が図られたことを強調していた。米国のメーカと旧ソ連の国が共同で会社を設立することに時代の流れを感じる。CANNON-MUSKEGON が開発した単結晶材の第三世代 CMSX-10 は Rolls-Royce の最新大型航空用エンジン Trent の動翼に採用されている。ヘビーデューティ型の発電用ガスタービンには、まだ第二世代 CMSX-4 とのことであった。

最終日に、ガルーダインドネシア航空のメンテナンス工場のプラントツアーが組まれていたので参加した。この工場は飛行場の一角にあり、工場の構成は、飛行機4機が格納できる大型建屋3棟とエンジン分解建屋およびエンジン組立後のテスト建屋から成る。

エンジン分解建屋では、分解後のタービン動静翼等の部品が見られない。これら動静翼や燃焼器のホット

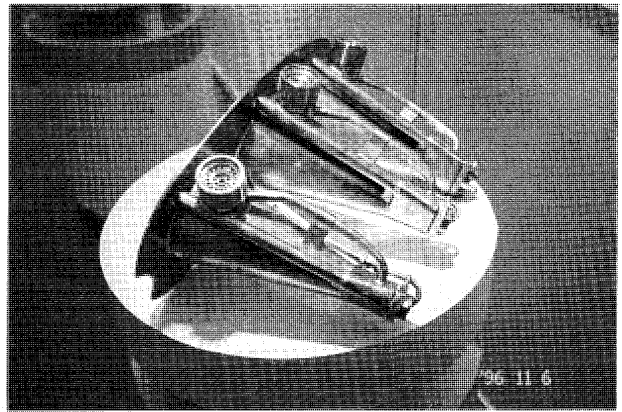


写真1 実物展示が少ない中、ABBブースの芸術作品を想わせる低 NO<sub>x</sub> EV パーナ

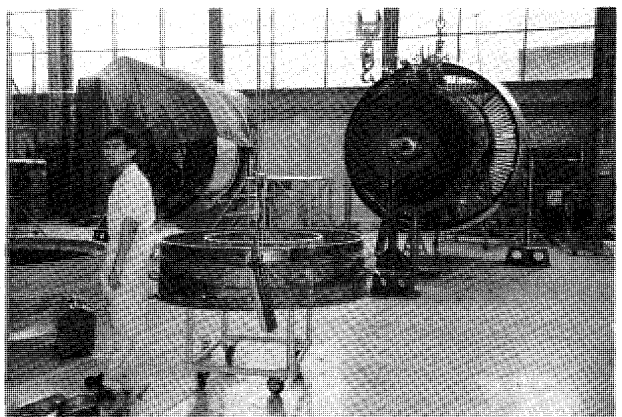


写真2 ガルーダインドネシア航空メンテナンス工場のエンジン分解建屋内

パーツや燃料噴射弁等の主要部品はこの工場では修理を行っておらず、シンガポールの修理工場や P & W, Rolls-Royce に送って修理をやっているとのこと。メンテナンス工場からホテルへの帰り道、工場専用バスがホテル近くの高速道路上でエンストしてしまった。切れ目のない車の流れの中を手を上げて道路を横断するというハプニングがあった。

最後に、1997年の ASME TURBO ASIA は、9月30日から10月2日までシンガポールで開催される旨の綴じ込みがあったので記しておく。

## 訪問記: 航空エンジンメーカーおよび関連環境研究機関

田丸 卓<sup>\*1</sup>

TAMARU Takashi

### 1. まえがき

このほど機会を得て、1996年8月下旬から9月一杯、標記に焦点をおいた10の研究機関と企業、13ヶ所を訪問した。主として航空エンジン燃焼器とその環境問題をテーマにして訪問要請をしたので面会したり見聞したりしたこともその分野に限られているが、読者の参考のために概略を紹介する。DLR-Köln 以外の研究機関や企業は著者にとっては初めての訪問である。全体的概要については既に多くの訪問者が報告していることから、特に印象に残った事柄についてのみ記述する。また、一部の訪問先については同じ頃、航技研森田部長が重複して訪ね本誌に寄稿するので省略する。

### 2. 政府関係研究機関

米国ではSandia National Laboratory (Livermore), NASA Lewis (Cleveland) と本部 (Washington, D. C.), 英国ではDRA (Farnborough), フランスではONERA (Palaiseau) およびドイツのDLR (Köln と Oberpfaffenhofen) を訪問した。

#### Sandia National Laboratory (Livermore)

ここは米国エネルギー省 (DOE) 所属の燃焼研究所で、レーザー利用燃焼研究と最近ではCHEMKIN プログラムなど化学反応ソフトの開発で有名である。連続燃焼、往復動エンジンの燃焼、および最近ではDial laser などレーザーの環境利用関係の研究活動を比較的オープンに見せてくれた。基礎から応用に近いものまで種々のテーマがあり研究活動紹介用に Technical Review 誌が発行されているので興味のある方はそれを参照されたい。研究所の職員は60~65人程度で、研究者と技術員の比率は2:1という。それ以外に130人もの契約研究者が滞在し、年間約800人の訪問者があるという。年間約21億ドルの予算を使っている。そのほかCHEMKIN など計算機ソフトを有料販売して利益をあげている。

#### NASA Lewis 研究所 (Cleveland) および本部 (Washington, D. C.)

訪問者管理が厳重でひとりでは絶対に歩かしてくれない。20年以上前、米国に滞在した頃の話になったとき、その頃は冷戦最中であつたにもかかわらず見学者などに

比較的オープンであつたという。特にLewisでは著者が興味のある燃焼とその計測に関する研究分野では、ドアにLimited area, Closed areaの表示があり見るのできない箇所が多かった。ワシントンNASA本部からの指示によるものらしい。それも数ヵ月前までは比較的寛容であつたという。このあとに訪れたNASA本部での話題内容と総合して低排出燃焼研究に技術保護の意識が強く働いていると思われた。状況から判断して現在、燃焼関係では超音速旅客機 (HSCT) 用に圧力比60のリッチリーン形低NO<sub>x</sub>燃焼器を研究している。10年以上前に整備した試験圧力4MPaの試験装置を改造し、6MPaでの燃焼試験を準備しており、その計測に光学機器の応用をはかっている様子である。

そのほかALLSPD-3Dという並列計算機用の乱流、噴霧などの計算可能なプログラムの開発を行っていて、応用をはかると共に国内の企業には販売もしているという。それらに熱力学基礎データを供給しているという年配の2人の研究者の存在が印象的であつた。NASAには定年がない。

Washington, D. C. のNASA本部では1995年末に航技研を来訪したことのあるL. J. Williams氏、環境研究文献でしばしば目にしていたH. L. Wesoky氏などと話し合った。以前からのE-mailによって会談内容をつめていたが科学技術協力協定に基づいた話題に限られることになった。すなわちエンジンに関する低排出技術はcompetitiveであるから話題としない、環境研究にしぼるということになった。この数年、技術流出にブレーキ



図1 Washington, D. C. のNASA本部

原稿受付 1997年1月17日

\*1 科学技術庁 航空宇宙技術研究所  
〒182 調布市深大寺東町7-44-1

をかけている米国の姿がここでも感じられた。それでも厚い環境関係報告書3冊を長旅の荷物になるからと別送してくれるなどこまかい心遣いをしてくれた。

#### DRA (Farnborough)

ここの正式名称は Defence Research Agency で英国の Ministry of Defence に属しており全体で 6800 人が働いている。ここはまた 1970 年代に航技研の FJR エンジンの試験を行ったところで、当時 NGTE という名称であった。ガスタービン関係では約 80 人の研究者が居り、特に騒音や排出特性に関した研究に力を入れているようであった。燃焼関係については燃焼器部分模型 (Sector) を 1.5 MPa の条件で内部ガス採取分析できる装置を用いている。そのプローブは外径約 12 mm ほどのもので冷却温水を 3 MPa の圧力で通しているもので模型の出口側から挿入し走査できる機構となっている。昔同様のことを大気圧で試みた著者にとって大変興味深かった。

低 NO<sub>x</sub> 燃焼器研究については今回の訪問予定の ONERA, SNECMA および Volvo Aero Corporation などとも協力関係にあるとのことであった。このなかで種々の NO<sub>x</sub> 低減方法を試みているようである。希薄予混合方式では燃焼温度を 1700 K 以下に保ち 95% の NO<sub>x</sub> 低下を目標にしているという。二次元的に燃料を供給し気流微粒化混合をはかる模型要素などを見せた。この日の午後にフランスへ移動する予定になっていて十分な見学と討議ができなかったのが残念であった。

#### ONERA (Palaiseau)

ここの詳細は森田部長の見聞記に譲るが、基礎研究分野では視覚的にも綺麗に設計製作された燃焼器部分模型で CARS や LDV などのレーザー応用計測を実施しているのが印象的であった。ここでは航技研との共同研究を積極的に希望していた。

#### DLR (Köln & Oberpfaffenhofen)

Köln はこれまでも訪れた人も多いので詳細は割愛する。燃焼器に関する微粒化、混合、またその測定法などの話となった。LIF などレーザーを用いた計測の応用をはかっていた。以下には今回の訪問でも主要な目的であった Oberpfaffenhofen の大気物理研究所 (Institut für Physik der Atmosphäre) について記す。DLR に所属するこの研究所は München 近郊の美しい自然の中にある。隣接する飛行場より Falcon 機を使って成層圏を含む大気環境観測研究を行っている。その機体は欧州各国の研究機関も共同利用しており、広範な研究に貢献している。そのため総アルミの多孔アングルでできたケージに種々の計器を組込めるようになっており、重量、重心計算だけ専門家に依頼すればよいようになっているとのことである。計器重量は 200 kg 程度までなら可能とのことである。

Ulrich Schumann 所長の話によると従来までの研究の結果、いまの所、現用航空機の大気汚染については

NO<sub>x</sub>, CO などは問題にするほどではないことがわかり、むしろ contrail, すなわち飛行機雲の影響を調べているという。そのほか衛星からのデータ解析, Dial Laser などによるリモートセンシングなど広範な研究を展開していた。日本に留学した研究者もいて、勉強した機器 (高精度 NO<sub>x</sub> 計) を日本の現レベル以上に応答時間を短縮し高性能化していたのが印象的であった。

### 3. 企業

米国の Boeing Company (Seattle) と General Electric (Cincinnati & Schenectady), 英国の Rolls-Royce (Derby), フランスの SNECMA, それにスウェーデンの Volvo Aero Corporation を訪ねた。出無精な著者ゆえにこれまで HYPR プログラムの関係で United Technology (Hartford) は訪問したことがあるが上記の諸企業は初めてである。

#### Boeing Company (Seattle)

予め希望していたように Boeing 社における超音速機開発への考え方と航空機排出についての認識が C. Carlin, S. Baughcum および D. DuBois によって説明され、著者の話した航技研での燃焼、環境研究紹介とともに議論した。その日の午後は Everett の B 747, B 767 および B 777 の生産工場を見学した。ゴルフカートで生産現場を縫うようにして案内してくれた。この地区の従業員は 23,000 人、Boeing 全体では 70,000 人以上で、各機とも月産 4~7 機という。それらの部品の一部を日本のメーカーが担当しているのは知っていたが、工場労働条件改善あるいは生産管理についても日本のコンサルタントが定期的に訪れアドバイスを与えているそうである。

#### General Electric (Cincinnati & Schenectady)

Cincinnati では Kenji Uenishi 博士が終始案内を努めてくれた。Reception Center も兼ねている Museum で、1971 年に開発中止となった米国 SST 用の GE 4 エンジンなどをみた。燃焼器関係では H. C. Mongia 博士が CF 6 と CFM 56 および LM-6000 などのエンジン燃焼器の排出特性改良について話してくれた。数値模擬の発達によりその結果は試験結果と一致するまでになっているという。

またエンジン取扱の教育を行っている Customer Technical Education Center と非破壊検査技術などの応用をはかっている Quality Technology Center をみた。特に後者では超音波技術や X 線 CT 断面技術を計算機と組合わせタービン翼内部などの詳細構造を立体的に検査できる技術などを案内してくれた。基礎的研究の成果を発展させ生産や検査技術に効果的に応用している点、国の研究機関の及ばないところであると感じた。

Cincinnati から 130 km ほど離れた場所にある Peebles 野外試験場も見学した。この施設は 6,700 エーカー (一辺 5.2 km 四方相当、航技研本所敷地の 230 倍) の広さである。GE 90 の完成品試験も本格的に行っていた。

GE 90 は現在、年産 60 台の割という。最大試験推力 105,400 ポンド (469 kN) の推力を達成した旨の、掲幕が掲げてあった。

Cincinnati のこの会社は最も完備した Agenda をつくって対応してくれた。責任者の挨拶状とともに Uenishi 博士と一緒に楽しんだ Labor day 花火見物、地元 Cincinnati Reds と Atlanta Braves とのホットドッグ片手の野球観戦まで記載してあった。ちなみにこの試合 7 対 6 で地元が勝ち、花火が上がった。

Schenectady では産業用ガスタービンの低 NO<sub>x</sub> 用バーナ開発試験現場を見た。午後訪れたのは美しい Mohawk 河岸にある Center of R & D である。そこでは S. M. Correa 博士が産業用、および航空用ガスタービンの出力、性能、排出実績の推移を話してくれた後、4 箇所の燃焼試験装置を見せてくれた。8 kg/s の空気量で 5 MPa までの試験ができるという。各種レーザー応用計測も実用していた。

#### Rolls-Royce (Derby)

HYPR にも時々顔を見せている Bryn Jones 氏が終始面倒を見てくれた。ICAO の NO<sub>x</sub> 規制強化に対して RR としての意見をきいたところ、たとえ達成困難なレベルであっても基本的にメーカーとして立場上ノーとは言えないと言う。RR としては現在決定されている ICAO の規制に対しては Single annular combustor を採用している Trent 800 で十分な対応ができると言っていた。外部委託も含め低 NO<sub>x</sub> 化を中心とする燃焼器研究の概要を聞いた。燃焼器研究用装置は最高圧力が 4 MPa 程度のものであって Double annular を含めた種々の燃焼器研究を行っている模様である。

#### SNECMA (Villaroche)

航技研に滞在したことのある Bruno James 氏が案内してくれた。今回の視察訪問中最もよく丁寧に研究概要を紹介し、見せてくれた所である。勿論 James 氏が航技研の燃焼器研究状況を熟知していることも一因であるが、実用機に直結した研究を行っている強みも見逃せない。特に低 NO<sub>x</sub> 化をはかる燃焼器については軍用エンジンも含め種々可能な限りの試みをしているように見えた。また NATUR や DIAMONT という数値模擬コードを用いて燃焼器改良や排出特性改善に役立っているという。

実験的には ONERA などとの協力により入口温度 800°C、6 MPa、流量 100 kg/s の環状燃焼器試験も可能という。

Villaroche で働いている 3700 人の約半数が生産部門で現在は 2 シフト制で生産しているという。CFM 56 の生産は順調で GE と合せて年 700 台の出荷という。それらエンジンの半数の Hot parts を GE より空輸してもらい、ここで組立試験して出荷する。残りの低圧側などの部品はこちらから GE に空輸して残りの半数を GE 側で組立試験し出荷するのだそうである。一つのエンジンをひとりの技術者が責任をもって組立るシステムになって

いる。ひとつのエンジンを仕上げるのに 5 週間かかるという。

排気清浄化の要求によって燃焼器を Double annular としたエンジンを外観だけから見たが、燃料供給管が錯綜し、その制御と maintenance の難しさが想像された。

#### Volvo Aero Corporation (Trollhättan)

著者にとってこの国を訪ねるのは初めてである。この人口 800 万人余の国が世界一の福祉を達成している上に Gripen や Viggen などの軍用機をエンジンをも含めて開発している航空宇宙分野の工業力はかねてからの興味ある点であった。

Volvo Aero Corporation は 1970 年は軍事関係の仕事が金額にして 90% を占めていたが、1994 年時点では 35% に低減しているという。現在、米国の P & W や GE あるいは小型のガスタービンメーカーとも協力関係を保っており、部品生産やエンジン開発の一部をになっているという。アリアンロケットのバルカンエンジンの燃焼器やノズルなども生産している現場をみた。著者らと同様のスペースプレーンエンジン用水素燃料亜音速場での燃焼研究をしていたが、ドイツのゼンガー計画の終了と共に 1996 年始めに研究を中止したと言う。その他の低 NO<sub>x</sub> 燃焼器研究も国際的な共同研究として行っている。第 3 段階となる 1996 から 2000 年の計画では ICAO 規制値の 70% を目標としているという。リッチリー型燃焼器については Volvo/SNECMA/ONERA の共同研究として 1997 年の ISABE で発表を予定しているという。

また著者も日本で関係のある自動車用セラミックガスタービンの研究をこの会社でも行っており、60 kW のエンジンで TIT は 1623 K、燃費は 200 g/kWh を達成したという。

#### 4. おわりに

以上全体的な印象としては国立研究機関は概して外部との共同研究、研究者の受入れ、派遣等の活動を積極的

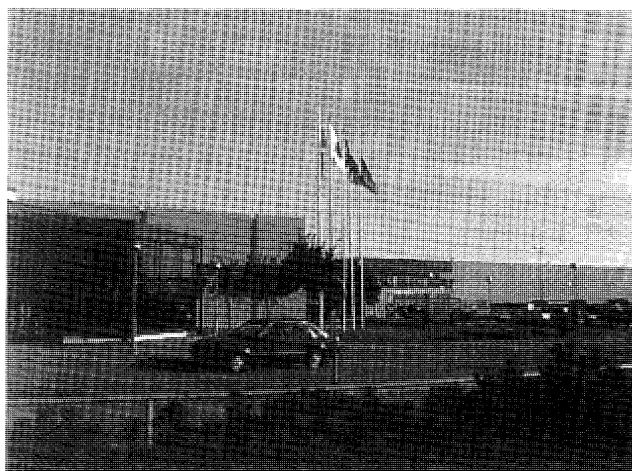


図2 Volvo では日の丸を掲げてくれた



に行っている。メーカーも国際的に協力関係が築かれており、研究成果が蓄積、応用がはかられ有効に活用されている。特に計算機利用により生産効率向上が計られている点が非常に印象的であった。

一般に燃焼器研究はレーザーを用いた光学的計測を基盤に詳細な測定を行っている。燃焼器設計改良に計算機数値模擬を用いているという説明はよく聞かされた。燃焼器実験も計算機模擬に貢献するデータを取得している研究がいくつか見られた。

燃焼器の研究はそのほとんどが低 $\text{NO}_x$ を主目的とした研究となってきた。各研究機関の研究をみていると著者らが行っている構想のものとよく似たものもあり、今後の発表のとき見ていったからと思われそうなのが唯一気掛かりになった。従来の日本の見学者が西欧に追いつく手段としてそのようなこともあったので自戒すべきであろう。

今回の旅行は訪問日程に余裕を持たせたため、比較的長いものとなったが、幸運にも交通機関その他に何の変更もなく、無事予定通りの訪問をこなすことができた。大部分の移動は飛行機を使ったが、その交通機関としての信頼性の高さが実感された。ただしニューヨークケネディ空港などの混雑はひどく、着陸待機や離陸待ちにそれぞれ約1時間も費やした。

訪問や移動のない日には、各地の博物館などを見た。SeattleのBoeing博物館、“Museum of Flight”, Uenishi博士に案内していただいたDaytonの“US Air Force Museum”, Munchenの“Deutsches Museum”などいずれも圧巻で過去の貴重な記念碑的の物品の保管、展示にはそれぞれ力を入れている印象をうけた。またCleavelandでは、たまたまAir Showがあり飛行デモと種々の航空機展示を楽しんだ。特にDaytonの博物館を見て超音速

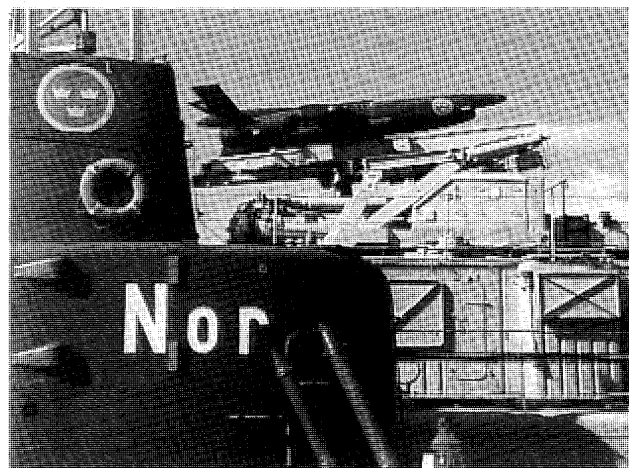


図3 スウェーデン、ヨーテボリでは退役した駆逐艦と潜水艦を公開している

機の技術は既に1960年代に完成の域に達していたのがいまさらながら実感できた。今後は航空機も自動車などと同様速度や環境などの社会的規制に従い、効率的な生産と利用の発展をなしていくものと予想される。

公務員の出張規定によりエコノミ席を余儀なくされ窮屈な思いをしたが、大柄な欧米人が同様の席に詰込まれている状況からは超音速機による時間短縮はともかく座席に余裕をもたせた大型機の必要性が納得できる。

今回の出張では訪問先の各出先機関、関連部署の関係者のお骨折りのおかげでほとんど支障なく訪問をこなすことができた。訪問先でもかぞえ切れない方々と知合い、貴重な時間を費やしての研究紹介をしていただいた。ここに深く感謝したい。最後にここに記した種々の数値は訪問を終えてから思いだして書いたものが多く、間違っていれば御叱正いただければ幸いである。

## 技術の性格

## —故フランク・ホイットル卿の業績を顧みて—

吉中 司\*1  
YOSHINAKA Tsukasaキー・ワード: フランク・ホイットル, WU 型エンジン, 技術, 半径平衡, 追悼  
Frank Whittle, WU Engine, Technology, Radial Equilibrium, Regium

昨年2月20日, 英国のクランフィールド大学で, 故フランク・ホイットル卿による設計・開発の最終型エンジン W.2/700 が, 約40年ぶりに始動された(図1)。これはクランフィールド大学の創立50周年記念行事の一つとして, 推進工学科が企画したものだ。

エンジンは始動モーターで先ず1,000 rpm まで増速され, そこでイグナイタの作動と燃料投入がなされた。そして2,000 rpm に達した時に始動モーターとの連結がはずれ, エンジンは完全な自立運転に入った。その後もエンジンは4,700 rpm まで滑らかに加速を続けていった。この報告は, 我々から見れば, 多少の差はあれ, 何のことはない, ジェットエンジンの当り前の始動プロ

セスを述べているにすぎない。

ここで時を60年前の1937年4月12日に戻してみよう<sup>(2)(5)</sup>。この日, ホイットルによる最初のジェットエンジン WU (もっとも, これは飛行型ではなく, プルーフ・オブ・コンセプトの為の地上試験エンジン) が, BTH (British Thompson-Houston) 社の工場敷地内にある実験室で, 初めて始動されることになっていた(図2)。エンジンを見守っているのは, 制御盤に立つホイットルと, エンジン試験責任者, 組み立て工等の十名足らず。モーター始動により1,000 rpm に達した時, 燃料が燃焼器内のパイロット・バーナーに注入された。観測窓を通して燃焼器内部を凝視していた者がパイロット点火の確

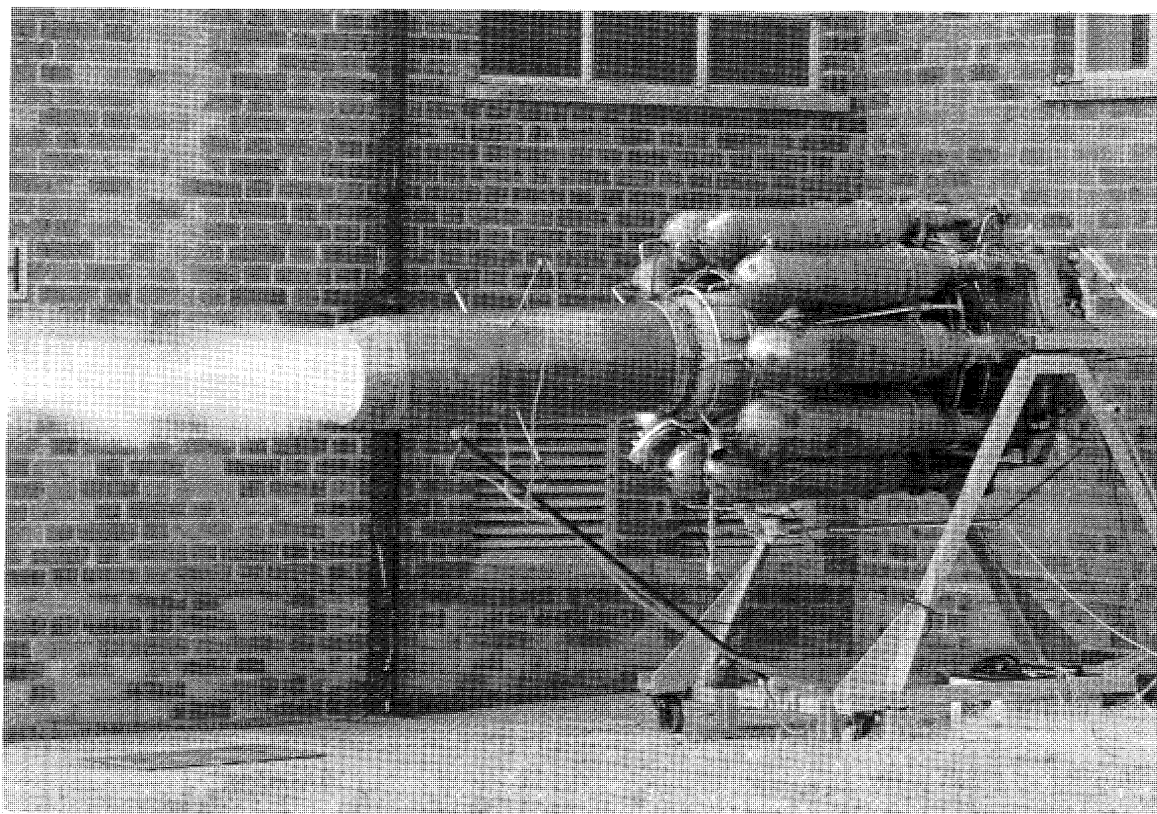


図1 W.2/700 エンジンの40年振りの始動  
(クランフィールド大学の厚意による)

原稿受付 1997年1月16日

\*1 Concepts ETI, Inc.

4 Billing Farm Road, White River Junction, Vermont  
05001, USA



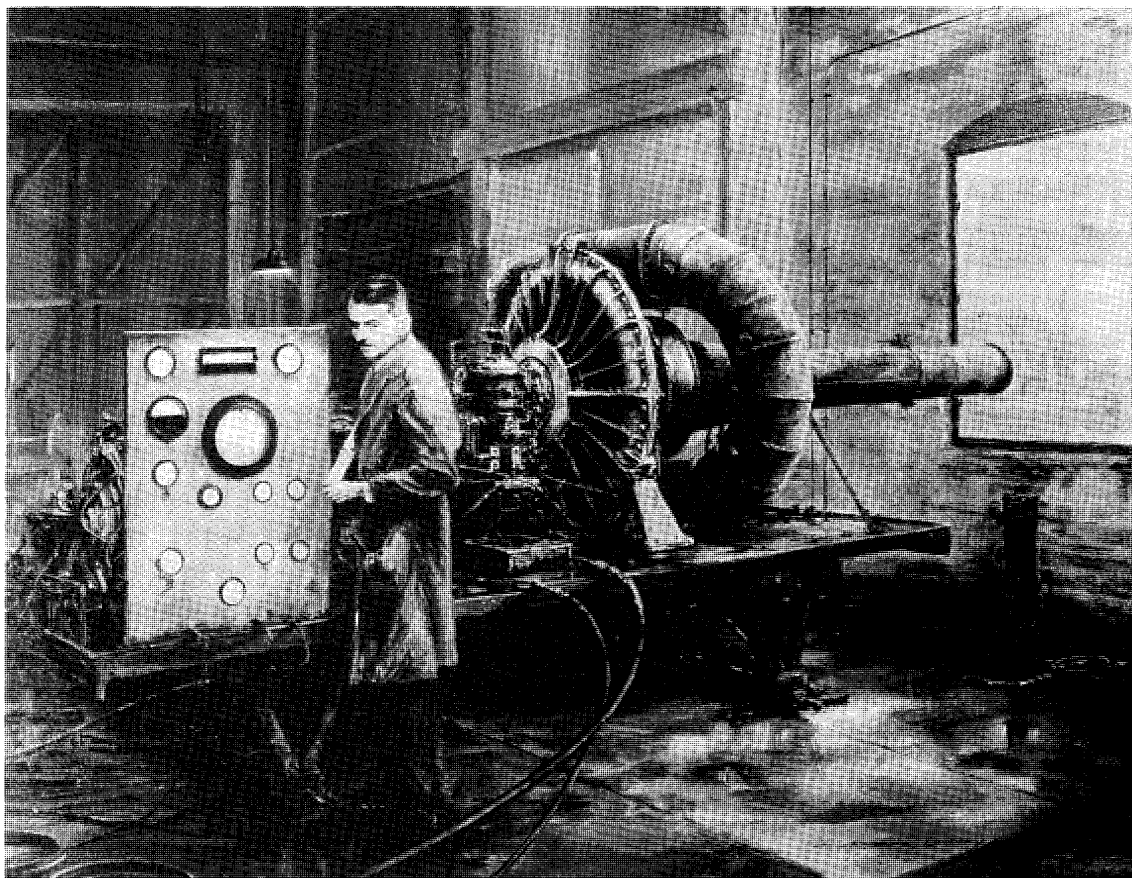


図2 若き日のホイットルと WU 型エンジン

(ロールスロイス社の依頼で画かれた絵で、ロドリック・ラブセー画伯の厚意による)

認をした後、エンジンは2,000 rpm まで加速された。そこで、メインの燃料弁がホイットルによって開かれると、エンジンはその直後の1~2秒間はためらう様にゆっくり加速したものの、その後は叫び声の様な騒音と共に急激な加速を始めた。この計画外のエンジン加速に、実験を見守っていた者達は、身の危険を直感して一目散に屋外へ逃げ出してしまった。制御盤のところに一人取り残されたホイットルは、急いで燃料弁を閉じたが、エンジンはなおも加速を続け、8,000 rpm 辺りを峠に、漸く減速に入った。翌日の夕方、燃料系統に手を加えた後、二度目のエンジン始動を試みたが、結果は初回より悪く、1,500 rpm を超えた頃から、メインの燃料弁を開く以前に、エンジンは加速を始める始末だった。しかも燃料パイプの継ぎ目から漏れる燃料が赤熱の排気管に落ちる毎に発火し、実験室は、まるで火の海だった。そこで、いろいろ考えたり試したりして原因を追求した結果、次の事があきらかになった。エンジンを始動する以前に、別のモーターにつながっている燃料ポンプの作動試験を数回することになっていたが、作動する度に少量の燃料がバーナーを通して燃焼器内に注入されている様だった。従ってエンジンが始動される頃には、或る程度の燃料が、燃焼器の底にたまっていたと考えられた。そこで、エンジン始動直前に、燃焼器からの燃料排液を必ず行うこと

になった。その後も、こまごました問題があったが、ようやくエンジンを制御しつつ、8,000 rpm にまで上げるのに成功した。設計回転数が17,750 rpm だから、約45%だ。ところが、今度は、いくら燃料を入れても、エンジン回転数は8,500 rpm 以上にならない、という問題にぶつかる。

上の話を一例にとると、知識とか技術というもの、どうも粋の様なもので、その内側にあるものは、明白なのだが、その外側になると、パイオニアが健康を害する程の努力をしないと正しい答が見つからない程の、暗闇なのだ。この粋を、エンジンのレイアウトにあてはめてみよう。ホイットルの計算では、地上で6,200 N の静止推力を得るには、圧縮比は4:1、流量は12 kg/s が必要となる。またエンジンの外径を小さくする為に回転数を上げねばならなかった。当時、高速圧縮機と言えば、航空用エンジンのターボチャージャーに使われていた位で、これだと、単段遠心圧縮機で圧縮比は精々2:1 を超す程度、流量は僅か1 kg/s だった。だから、当時の技術の粋内で設計したのでは、エンジンの前面面積が大きくなりすぎて、航空用エンジンとしては失格である。そこでホイットルは、あえてインペラを両側吸い込みとし、回転数を17,750 rpm まであげて圧縮比を稼ぎ、同時にエンジンの小型化を計った。これでインペラ外径は0.48 m

納まったものの、周速は当時の 330~360 m/s の枠から一挙に 450 m/s にまで増す必要があった。

この圧縮機は、目標効率を 80% とおいても 2,300 kW 近くの動力を必要とした。ホイットルは、これを単段軸流タービンで駆動することにしたが、2,300 kW といえば、1930 年代の航空用エンジン出力を遥かに上回るものだった。これ丈のエネルギーをタービンに与えた後、排気口から出て来るジェットで 6,200 N の推力を出さねばならないことから、タービン入口温度は 1,052 K と設定された。圧縮比 4:1、流量 12 kg/s の空気を 1,052 K まで上げるには、毎時 900 l 程度の燃料が要る。この燃料を 0.2 m<sup>3</sup> 程の燃焼器内で燃やそうとしたから、当時の枠（ボイラー用燃焼器）に比べて、エネルギー密度は少なくとも 20 倍以上の値だった。

だから、こうした計算結果を検討した英国空軍省が、こんな厳しい条件下で満足に使う材料がなく……、と評価したのは、枠内で考える限り、理解出来る。ホイットルは、こうした飛躍した技術水準に達するのに自信があった、と言われている。しかし、どういう根拠で彼に自信があったのか、筆者が読んだ限りの資料や、ホイットル卿御自身の講演からは、答を見つけることが出来なかった。この辺りに、開発資金を得るのに困難につきまといわれた原因があったのだろうか。

これも技術の性格の一面なのだろう。既に確立している技術をマスターする事は必要でも、それらに挑戦し、その枠を越えない限り、技術の発展はない。もちろん、枠を越えさえすれば良い、という訳ではなく、そこに技術の難しさがあり、面白さがある。

この枠について、ホイットル卿にかかわる有名なエピソードが、もう一つある。今日、半径平衡式と言え、大学生でも知っている基礎知識だ。しかし、1937 年、事情は随分違っていた。当時、ホイットルはタービンの設計を、蒸気タービン・メーカーの BTH 社に委託していた。そうした或る日、BTH 社の技師による軸受にかかる推力の計算値が、ホイットルの予期値と余りに違っているのに気付いた。そこでホイットルが BTH 社の技師と色々比較検討した結果、BTH 社のタービン設計法では、全圧一定の流れが円環状通路内を通る場合、Cu が零でない限り半径方向に静圧がかかるという現象を、考慮していない事が分かった。ホイットルに言わせれば、ターボ機械の空力設計をする者にとっては当たり前である筈の知識が、BTH 社の技術者達にとっては、今まで聞いたこと

もなければ、そんな現象を考慮しなくとも、ちゃんとタービンを設計出来る、となるのだ。それまで何かと意見の食い違いのあった両者は、この事件がきっかけとなって、後戻りの出来ない、深刻な相互不信に陥ってしまった。ホイットルの軸流タービンは、外径が僅か 0.42 m ではないにも拘らず、単段で 2,250 kW からの出力を要求されている。当時のタービンとしては随分高い段出力だったろうし、タービン動翼の上下流で、かなりの Cu 値になっていたに違いない。又、タービンが小型なので半径の影響が顕著になる。一方 BTH 社のタービンはホイットルのものに比べて数倍も大きく、流量当りの段出力は随分低かったのではなかろうか。従って、半径方向の静圧非一様性が空力特性に及ぼす影響が余り大きくなかったのかも知れない。しかし、こうした流れの場の背景を理解した上で無視するのと、それを知らずに既存の設計法を鵜呑みしているのでは、大きな枠の違いがある。今でも、自社で始めた技術ではないという理由で、故意に枠を広げる機会を避けようとするのを、稀に見るが、これも上の例に似て、技術発展の足かせと言えよう。

ホイットル卿が昨年 8 月 9 日（現地時間）、肺癌のため他界されてから、早や半年がたつ。その間、卿の業績を讀める丈が幾つか書かれた<sup>(6),(7)</sup>。そこで、ここでは、彼の業績を通して伺われる、技術の性格というものを、考え直してみた。そして、この拙文をもって、卿への追悼の言葉としたい。

後記: 本会の編集委員であられる室田光春氏に、この文を作るにあたって、特に資料集めに、大きなお世話になった。

## 参考資料

- (1) Singh, R., Attached Note to Fifty Years of Civil Aero Gas Turbines, Cranfield Univ. (1996)
- (2) Golley, J., Whittle, the True Story, (1987) Airline
- (3) 小茂鳥和生, ホイットル自伝より, GTCJ3-9, (1975) p. 40
- (4) 小茂鳥和生, ホイットル自伝より (続), GTCJ3-10 (1975) p. 31
- (5) Smith, C. O., Frank Whittle and The Jet Engine, DE-Vol. 83, Vol. 2, ASME, (1995)
- (6) Hawthorne, W. R., Some Notes on Frank Whittle's Contribution to The Turbo-Jet, vol. 36, No. 3, Global Gas Turbine News, IGTI, (1996) p. 5
- (7) In: Memorium-Sir Frank Whittle, Aviation Week and Space Technology, August 19 Issue (1996)

# 国際標準化機構・ガスタービン専門委員会 ISO/TC 192 の作業グループ JWG 4 及び WG 6 の東京国際会議開催報告

日本内燃機関連協会 青木 千明  
AOKI Chiaki

## 1. 全般

昨 1996 年の 9 月 9～12 日に、国際標準化機構 ISO のガスタービン専門委員会 TC 192 の中に設置されている 7 作業グループ WG のうち、JWG 4 及び WG 6 の 2 つの作業グループがそれらの国際会議を東京で開催した。ガスタービン専門委員会 ISO/TC 192 関係の国際会議が日本で開かれたのは、今回が初めてであり、会議として大きな成果をあげ、関係者の国際交流を深めることにも大きく寄与できたと思われるので、ここにガスタービン学会の会員の皆様にもご紹介して、ご参考供したい。

ガスタービンに関わる標準化活動の動向については、当学会誌の 1996 年 9 月号で詳しくご紹介した通りであり、その中でも ISO に関わる活動は重要な位置を占めている。ISO/TC 192 (ガスタービン) の国内対策委員会の事務局は、日本の ISO に対すとりまとめを行っている通商産業省工業技術院からの事業委託を日本規格協会経由で受けて、日本内燃機関連協会が行っている。

ISO/TC 192/JWG 4 (用途) 及び WG 6 (制御・計装・補機) の 2 つの作業グループの活動は近年活発であって、一昨年頃からその国際会議をまだ開催したことのない日本で開いてみてはという意見が出始め、それを受けて日本の国内対策委員会として事務局の日本内燃機関連協会と連携して国際会議の東京開催を提案し、今回の 1996 年 9 月の東京国際会議が実現したものである (写真 1)。

東京開催が最終決定したのが昨年 6 月のイギリスでのバーミンガム国際会議であったので、本格的な準備期間が 2 か月余りしかなく、委員 7 名で準備委員会を早速作って諸準備に当たった。会議場を、新橋にあって日本内燃機関連協会の事務所にもきわめて近い「蔵前工業会館」に選定し、それを中心にレセプションや見学会等の行事の計画などを進めた。また、参加外国人用のホテルとして、準備委員のご協力を得て、会場から徒歩で 10 分程度の「銀座第一ホテル」を選び、事務局がホテルの申込みを受け付け、9 名の外国人参加者(ドイツ 4, イギリス 3, フランス 1, スイス 1) 全員がここに宿泊滞在した。

行事の中心として、会議の第 1 日 (9 月 9 日(月)) の夕刻に、2 つの WG 合同のレセプションを、新橋にある中華料理店「新橋亭 (シンキョウテイ) 本店」で開催し、外国人 9 名を含む 23 名が参加して、関係者相互の懇親と国際交流に非常に有意義な会合となった (写真 2)。

今回、国際会議の事務局も国内対策委員会の事務局の

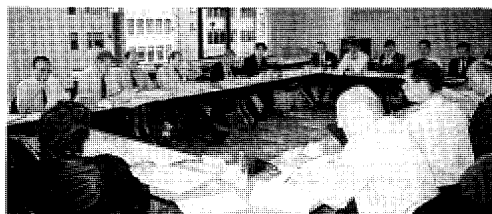


写真 1 東京国際会議の様子 (蔵前工業会館 701 号室)

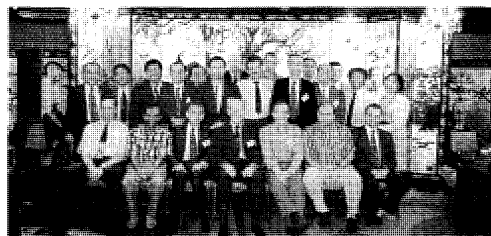


写真 2 合同レセプション会場での参加者一同

ある日本内燃機関連協会の事務所においたため、関連する主要な場所がいずれも JR/地下鉄の新橋駅を中心に徒歩で 10 分以内の範囲内となり、非常に便利で有機的な会議運営を行うことができた。また、心配していた気候・天候も、幸いにも 9 月の初めながらそれ程暑くはなく、その前後には台風の発生もなく、良い会議となった。

## 2. TC 192/JWG 4 国際会議の概要

TC 192/JWG 4 作業グループは、「ガスタービン用途」(Gas turbine use/application)の名称で、TC 192 (ガスタービン) と TC 67 (石油ガス工業)/SC 6 (装置及びシステム分科会) との合同作業グループ (Joint WG) である。

現在、TC 192 では既に制定されている ISO 3977: 1991 “Gas turbines-Procurement” (ガスタービン調達仕様) にパート制を導入して、その内容をさらに充実させるための作業・審議を行っている。TC 192/JWG 4 は、そのうちの用途別の仕様、特に機械駆動用ガスタービンの使用が多い石油ガス工業用ガスタービンを中心として、それに関連する「基本要素事項」、「パッケージング及び補機」、「技術情報」、「検査、試験及びコミッショニング」などに関する仕様規格案を作成している。この作業は、ユーザ側の内部規格であるアメリカ石油化学規格 API と密接な関係があり、API 規格に対応した国際規格の ISO を作成している ISO/TC 67/SC 6 との合同作業を、ユーザ側委員も参加して実施している。

TC 192/JWG 4の国際会議は、9日(月)、10日(火)の丸2日にわたって、5か国の委員が合計23名(うち外国人9名)出席し、JWG 4の幹事(Convenor)であるドイツのMr. M. Perkavecが議長で会議を行った。TC 192国内対策委員会の田中英穂委員長及び工業技術院標準部機械規格課の中林賢司担当官もご出席頂いた。関係する規格案の作成はほぼ完成しつつあり、今回の会議では、「技術情報」、「検査、試験及びコミッショニング」等の検討・審議が遅れていた部分について、日本及びイギリスから提出されたコメントを中心に審議が行われた。

現在審議を進めている規格案をまとめて、上部機関のTC 192にCD(Committee Draft)として提案する時期を、1997年6月目標としていることから、今回残された懸案事項も含め、次の会議を1996年12月にフランスのベルフォートで開催することにし、会議は成功裡に終了した。

### 3. TC 192/WG 6 国際会議の概要

TC 192/WG 6作業グループは、「制御・計装・補機」(Control, instrumentation and auxiliary equipment)という名称であり、JWG 4と同様にかつJWG 4と連携をとりつつ、ISO 3977: 1991の内容をさらに充実させるために、そのうちの「制御・計装」及び「補機」関係の仕様規格案を作成している。

TC 192/WG 6の国際会議は、11日(火)及び12日(水)の午前中の1日半にわたって、4か国の委員が合計16名(うち外国人6名)出席し、WG 6の幹事(Convenor)であるイギリスのMr. P. Doningtonが議長で会議を行った。今回の会議では、日本、フランス、スイス、イギリスからのコメントを中心に、定義の見直しや、制御・計装に関わるData Sheet案に対する検討・審議を行った。

WG 6でも、審議中の規格案を上部機関TC 192にCDとして提案する時期を1997年6月目標としており、次の会議をJWG 4に合わせ1996年12月にフランスのベルフォートで開催する予定にし、会議は同様に成功裡に終了した。

### 4. 見学会の概要

今回、2つの見学会を計画し実施した。まず、国際会議参加者の多くが参加し易いように、会議4日目の12日(水)午後に東京電力㈱横浜火力発電所の技術見学会を行った。次いで、翌日の13日(木)にオプショナル・ツアーの形で、京都の㈱堀場製作所本社工場を見学した。

#### (1) 技術見学会の概要

すべての会議終了後の12日(水)午後に、4か国17名(うち外国人6名)が参加して、東京電力㈱のご好意で同社横浜火力発電所を見学した(写真3)。

横浜火力発電所は、在来の蒸気火力発電所(6基合計出力1225 MW)に加えて、最近最新鋭のガスタービン・コンバインドサイクル発電所を建設中である。これは、ア



写真3 横浜火力発電所 C. C. プラントモデルの前で



写真4 京都ツアーでの金閣寺にて

メリカ GE 社の最新鋭 MS 9001 FA 型ガスタービン(225 MW) 8基を使用して日立製作所及び東芝が建設を行っているもので、8基合計出力2800 MW(単基350 MW)であり、そのうちの2基は既に営業運転に入っていた。

貸切バスで現地に午後2時頃に到着し、技術説明のあとマイクロバスで構内の見学及びコンバインドサイクル発電所建屋内での見学をさせて頂いた。大規模で環境等にもよく配慮されたプラントは、参加者全員にきわめて強い印象を与え、非常に有益な見学会であった。

#### (2) オプショナル・ツアー見学会

会議終了翌日の13日(木)に、オプショナル・ツアーとして3か国13名(うち外国人3名)が参加し、㈱堀場製作所のご好意で京都にある同社の本社工場を見学した。

同社は、エンジンの排気排出物や大気汚染物質などの計測装置では世界的なメーカであり、その他の計測装置の分野でも常に先端を行くものを市場に提供している。

新幹線で東京を朝に出発し、正午過ぎに京都駅前に集合して、マイクロバスで本社を訪問、昼食後会社概要説明を受けてから本社工場を見学させて頂いた。積極的な技術開発を進めながらの事業発展と社会的貢献の様子に、参加者一同大きな感銘を受けた。その後、京都市内見学(写真4)と懇親会を行い、意義深い見学会となった。

### 5. 結言

今回の東京国際会議開催に際しては、工業技術院の補助金を賜り、また委員会・団体から特別分担金のご協力も賜り、誠にありがとうございました。さらに、熱心に審議に参加して頂いた会議出席者の方々及び見学会を快く受入れて頂いた各社に、厚くお礼を申し上げます。

外国人参加者からも、会議の成功と懇切な対応に対し深い感謝の言葉を頂いた。これを機に、さらに我が国として国際的貢献を果たして行けることを期待している。

## 第25回 ガスタービンセミナー報告

㈱新潟鉄工所 黒川 肇  
KUROKAWA Hajime

平成9年1月23日、24日の2日間にわたり、第25回ガスタービンセミナーが、171名の受講者を得て盛大に開催されました。会場は前回と同じく東京ガス㈱殿のご厚意に依り、浜松町の本社大会議室を使用させて頂きました。

近年、ガスタービンの目覚ましい技術進歩と、普及の高まりに伴い、より合理的にこれを運用せんとするいわゆる規制緩和が進行しつつあります。今回のガスタービンセミナーでは、この規制緩和に焦点をあて、「ユーザーリエントなガスタービンを目指して」をテーマに掲げユーザーとメーカー双方から、ご講演を賜りました。

第1日目は「規制緩和に対応した発電システムの運用」をサブテーマに、電気事業法の改正内容に関する講演に続き、大・中・小各規模の発電システムを運用されている方々から講演を戴きました。翌第2日目は「新しい時代に向けてのユーザーとメーカーの接点の在り方」をサ

ブテーマとして、ジェットエンジンのプロダクトサポート、保守技術についての講演、更に大型・中型ガスタービンメーカーの対応について講演が行われました。

いずれの講演も内容が深く、又最新の技術を盛り込んだもので、各分野の方々から貴重な話題を豊富に得ることができました。受講された皆様からも、講義毎に活発な質疑がなされましたことは、規制緩和に対する関心の高さを示すものでありました。

尚、本ガスタービンセミナー終了後に、企画、運営に関するアンケートを集計させて頂きましたので、今後の企画に反映させて頂きたいと考えます。

最後に、講演準備に尽力されました講演者の方々、会場の提供と準備に御協力戴いた東京ガス㈱殿、そして御多忙中の処、御参加戴いた皆様に厚く御礼申し上げる次第です。

(企画委員会委員)

## 本会協賛・共催行事

| 会 合 名                | 開催日・会場                            | 詳細問合せ先                                      |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|
| '97 航空ビジョン講演会        | H 9/3/7<br>日本学術会議講堂               | 航空宇宙技術研究所<br>TEL 0422-47-5911 (内線 5250)     |
| 平成9年度 (第5回) 可視化情報講座  | H 9/6/3-7/4<br>東京電機大学             | 東京電機大学 学務部学事課 担当 本田<br>TEL 03-5280-3555     |
| CFD による物体まわりの流れと抗力予測 | H 9/6/26<br>日本機械学会会議室             | 日本機械学会<br>TEL 03-5360-3505                  |
| 創立100周年記念機器展示会       | H 9/7/15-17, 7/21-23<br>東京国際フォーラム | 日本機械学会 担当 寿山<br>TEL 03-5360-3508            |
| 第29回乱流シンポジウム         | H 9/7/29-31<br>工学院大学新宿校舎          | 日本流体力学学会<br>TEL 03-3714-0427                |
| 第8回計算流体シンポジウム        | H 9/7/29-31<br>工学院大学新宿校舎          | 日本流体力学学会<br>TEL 03-3714-0427                |
| 第2回環境流体シンポジウム        | H 9/7/29-31<br>工学院大学新宿校舎          | 日本流体力学学会<br>TEL 03-3714-0427                |
| 第14回内燃機関シンポジウム       | H 9/9/3-5<br>名古屋国際会議場             | 自動車技術会 事務局会員部門<br>TEL 03-3262-8211          |
| 第10回輸送現象国際会議         | H 9/11/30-12/3<br>京都市リサーチパーク      | 京都大学工学研究科機械工学専攻気付<br>鈴木健二郎 TEL 075-753-5250 |

## 第25回 ガスタービンセミナー報告

㈱新潟鉄工所 黒川 肇  
KUROKAWA Hajime

平成9年1月23日、24日の2日間にわたり、第25回ガスタービンセミナーが、171名の受講者を得て盛大に開催されました。会場は前回と同じく東京ガス㈱殿のご厚意に依り、浜松町の本社大会議室を使用させて頂きました。

近年、ガスタービンの目覚ましい技術進歩と、普及の高まりに伴い、より合理的にこれを運用せんとするいわゆる規制緩和が進行しつつあります。今回のガスタービンセミナーでは、この規制緩和に焦点をあて、「ユーザオリエントなガスタービンを目指して」をテーマに掲げユーザーとメーカー双方から、ご講演を賜りました。

第1日目は「規制緩和に対応した発電システムの運用」をサブテーマに、電気事業法の改正内容に関する講演に続き、大・中・小各規模の発電システムを運用されている方々から講演を戴きました。翌第2日目は「新しい時代に向けてのユーザーとメーカーの接点の在り方」をサ

ブテーマとして、ジェットエンジンのプロダクトサポート、保守技術についての講演、更に大型・中型ガスタービンメーカーの対応について講演が行われました。

いずれの講演も内容が深く、又最新の技術を盛り込んだもので、各分野の方々から貴重な話題を豊富に得ることができました。受講された皆様からも、講義毎に活発な質疑がなされましたことは、規制緩和に対する関心の高さを示すものでありました。

尚、本ガスタービンセミナー終了後に、企画、運営に関するアンケートを集計させて頂きましたので、今後の企画に反映させて頂きたいと考えます。

最後に、講演準備に尽力されました講演者の方々、会場の提供と準備に御協力戴いた東京ガス㈱殿、そして御多忙中の処、御参加戴いた皆様に厚く御礼申し上げる次第です。

(企画委員会委員)

## 本会協賛・共催行事

| 会 合 名               | 開催日・会場                            | 詳細問合せ先                                      |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|
| '97 航空ビジョン講演会       | H 9/3/7<br>日本学術会議講堂               | 航空宇宙技術研究所<br>TEL 0422-47-5911 (内線 5250)     |
| 平成9年度 (第5回) 可視化情報講座 | H 9/6/3-7/4<br>東京電機大学             | 東京電機大学 学務部学事課 担当 本田<br>TEL 03-5280-3555     |
| CFDによる物体まわりの流れと抗力予測 | H 9/6/26<br>日本機械学会会議室             | 日本機械学会<br>TEL 03-5360-3505                  |
| 創立100周年記念機器展示会      | H 9/7/15-17, 7/21-23<br>東京国際フォーラム | 日本機械学会 担当 寿山<br>TEL 03-5360-3508            |
| 第29回乱流シンポジウム        | H 9/7/29-31<br>工学院大学新宿校舎          | 日本流体力学学会<br>TEL 03-3714-0427                |
| 第8回計算流体シンポジウム       | H 9/7/29-31<br>工学院大学新宿校舎          | 日本流体力学学会<br>TEL 03-3714-0427                |
| 第2回環境流体シンポジウム       | H 9/7/29-31<br>工学院大学新宿校舎          | 日本流体力学学会<br>TEL 03-3714-0427                |
| 第14回内燃機関シンポジウム      | H 9/9/3-5<br>名古屋国際会議場             | 自動車技術会 事務局会員部門<br>TEL 03-3262-8211          |
| 第10回輸送現象国際会議        | H 9/11/30-12/3<br>京都市リサーチパーク      | 京都大学工学研究科機械工学専攻気付<br>鈴木健二郎 TEL 075-753-5250 |

## 第 22 期通常総会・特別講演会のお知らせ

標記総会・特別講演会を下記により開催致します。ご多忙とは存じますが、正会員の皆様のご出席をお願い致します。

記

開催日: 平成 9 年 4 月 21 日(月) 13:00~16:30

会場: 機械振興会館 6 F 65 会議室

## (1) 第 22 期通常総会

開催時間: 13:00~15:20

- 議 事: 1) 平成 8 年度事業報告  
2) 同 決算報告, 監査報告  
3) 平成 9 年度評議員・監事選挙結果報告

4) 平成 9 年度役員選出

5) 同 事業計画

6) 同 予算

7) 文部省提出の平成 10 年度事業計画・予算案の取扱いの件

8) 名誉会員選考委員会報告

## (2) 特別講演会

開催時間: 15:30~16:30

演題ならびに講師

「ガスタービンに魅せられて 50 年」

三輪光砂氏 (船舶技術研究所 研究顧問)

## 「第 3 回ガスタービン教育シンポジウム開催」のお知らせ (予告)

学生及び若手技術者を対象とした標記シンポジウムを開催しますので奮ってご参加ください。

1. 日 時: 平成 9 年 7 月 22 日(火), 23 日(水)

2. 場 所: 航空宇宙技術研究所 管理部講堂他  
(東京都調布市)

## 3. シンポジウムプログラム (予定)

第 1 日目 午前: ガスタービン概論,  
午後: 研究所見学, 終了後懇親会 (有料)

第 2 日目 講義 4 件程度 (ガスタービンと流体力学, 伝熱工学, 燃焼工学, 材料工学等)

## 4. 参加要領

(1) 定 員: 60 名程度

(2) 対象者: 理工系大学, 大学院, 高等専門学校, 工業高校在籍者, 若手技術者

(3) 参加費: 無料の予定

申し込み方法等の詳細は本誌 6 月及びポスターをご覧ください。

## 第 12 回ガスタービン秋季講演会 (奈良)・見学会のお知らせ

第 12 回ガスタービン秋季講演会を, 下記の日程で奈良市にて開催致します。

## 開催日

1997 年 (平成 9 年) 10 月 16 日(木), 17 日(金)

例年より 2 週間早くなっていますのでご注意下さい。

## 開催場所 奈良県奈良市内,

講演会: 奈良県新公会堂 (奈良公園内)

懇親会: 春日大社内景雲殿

## 講演申込締切 1997 年 (平成 9 年) 7 月 18 日(金)

例年の秋季講演会は好評で, 多数の講演申込みがあります。早めの申し込みをお薦め致します。

講演原稿締切 1997 年 (平成 9 年) 9 月 9 日(金)

開催日に合わせて例年より早い期日となります。

募集論文内容 会誌 6 月号にオーガナイズドセッション等の詳細をお知らせします。ステューデントセッションの企画の予定はありません。

見学会 堺市焼却場コンバインドサイクルあるいは毎日新聞社ガスタービン発電設備 (大阪駅前) と橿原考古学研究所・博物館を組み合わせたバス見学ツアーを検討しております。

※当地は最盛期でもありますので, 早めに宿泊等の参加計画をお考え下さい。



## 第 22 期通常総会・特別講演会のお知らせ

標記総会・特別講演会を下記により開催致します。ご多忙とは存じますが、正会員の皆様のご出席をお願い致します。

記

開催日: 平成 9 年 4 月 21 日(月) 13:00~16:30

会場: 機械振興会館 6 F 65 会議室

(1) 第 22 期通常総会

開催時間: 13:00~15:20

- 議 事: 1) 平成 8 年度事業報告  
2) 同 決算報告, 監査報告  
3) 平成 9 年度評議員・監事選挙結果報告

4) 平成 9 年度役員選出

5) 同 事業計画

6) 同 予算

7) 文部省提出の平成 10 年度事業計画・予算案の取扱いの件

8) 名誉会員選考委員会報告

(2) 特別講演会

開催時間: 15:30~16:30

演題ならびに講師

「ガスタービンに魅せられて 50 年」

三輪光砂氏 (船舶技術研究所 研究顧問)

## 「第 3 回ガスタービン教育シンポジウム開催」のお知らせ (予告)

学生及び若手技術者を対象とした標記シンポジウムを開催しますので奮ってご参加ください。

1. 日 時: 平成 9 年 7 月 22 日(火), 23 日(水)

2. 場 所: 航空宇宙技術研究所 管理部講堂他  
(東京都調布市)

3. シンポジウムプログラム (予定)

第 1 日目 午前: ガスタービン概論,  
午後: 研究所見学, 終了後懇親会 (有料)

第 2 日目 講義 4 件程度 (ガスタービンと流体力学, 伝熱工学, 燃焼工学, 材料工学等)

4. 参加要領

(1) 定 員: 60 名程度

(2) 対象者: 理工系大学, 大学院, 高等専門学校, 工業高校在籍者, 若手技術者

(3) 参加費: 無料の予定

申し込み方法等の詳細は本誌 6 月及びポスターをご覧ください。

## 第 12 回ガスタービン秋季講演会 (奈良)・見学会のお知らせ

第 12 回ガスタービン秋季講演会を, 下記の日程で奈良市にて開催致します。

開催日

1997 年 (平成 9 年) 10 月 16 日(木), 17 日(金)

例年より 2 週間早くなっていますのでご注意下さい。

開催場所 奈良県奈良市内,

講演会: 奈良県新公会堂 (奈良公園内)

懇親会: 春日大社内景雲殿

講演申込締切 1997 年 (平成 9 年) 7 月 18 日(金)

例年の秋季講演会は好評で, 多数の講演申込みがあります。早めの申し込みをお薦め致します。

講演原稿締切 1997 年 (平成 9 年) 9 月 9 日(金)

開催日に合わせて例年より早い期日となります。

募集論文内容 会誌 6 月号にオーガナイズドセッション等の詳細をお知らせします。ステューデントセッションの企画の予定はありません。

見学会 堺市焼却場コンバインドサイクルあるいは毎日新聞社ガスタービン発電設備 (大阪駅前) と橿原考古学研究所・博物館を組み合わせたバス見学ツアーを検討しております。

※当地は最盛期でもありますので, 早めに宿泊等の参加計画をお考え下さい。



## 第 22 期通常総会・特別講演会のお知らせ

標記総会・特別講演会を下記により開催致します。ご多忙とは存じますが、正会員の皆様のご出席をお願い致します。

記

開催日: 平成 9 年 4 月 21 日(月) 13:00~16:30

会場: 機械振興会館 6 F 65 会議室

## (1) 第 22 期通常総会

開催時間: 13:00~15:20

議 事: 1) 平成 8 年度事業報告  
2) 同 決算報告, 監査報告  
3) 平成 9 年度評議員・監事選挙結果報告

4) 平成 9 年度役員選出

5) 同 事業計画

6) 同 予算

7) 文部省提出の平成 10 年度事業計画・予算案の取扱いの件

8) 名誉会員選考委員会報告

## (2) 特別講演会

開催時間: 15:30~16:30

演題ならびに講師

「ガスタービンに魅せられて 50 年」

三輪光砂氏 (船舶技術研究所 研究顧問)

## 「第 3 回ガスタービン教育シンポジウム開催」のお知らせ (予告)

学生及び若手技術者を対象とした標記シンポジウムを開催しますので奮ってご参加ください。

1. 日 時: 平成 9 年 7 月 22 日(火), 23 日(水)

2. 場 所: 航空宇宙技術研究所 管理部講堂他  
(東京都調布市)

## 3. シンポジウムプログラム (予定)

第 1 日目 午前: ガスタービン概論,  
午後: 研究所見学, 終了後懇親会 (有料)

第 2 日目 講義 4 件程度 (ガスタービンと流体力学, 伝熱工学, 燃焼工学, 材料工学等)

## 4. 参加要領

(1) 定 員: 60 名程度

(2) 対象者: 理工系大学, 大学院, 高等専門学校, 工業高校在籍者, 若手技術者

(3) 参加費: 無料の予定

申し込み方法等の詳細は本誌 6 月及びポスターをご覧ください。

## 第 12 回ガスタービン秋季講演会 (奈良)・見学会のお知らせ

第 12 回ガスタービン秋季講演会を, 下記の日程で奈良市にて開催致します。

## 開催日

1997 年 (平成 9 年) 10 月 16 日(木), 17 日(金)

例年より 2 週間早くなっていますのでご注意下さい。

## 開催場所 奈良県奈良市内,

講演会: 奈良県新公会堂 (奈良公園内)

懇親会: 春日大社内景雲殿

## 講演申込締切 1997 年 (平成 9 年) 7 月 18 日(金)

例年の秋季講演会は好評で, 多数の講演申込みがあります。早めの申し込みをお薦め致します。

講演原稿締切 1997 年 (平成 9 年) 9 月 9 日(金)

開催日に合わせて例年より早い期日となります。

募集論文内容 会誌 6 月号にオーガナイズドセッション等の詳細をお知らせします。ステューデントセッションの企画の予定はありません。

見学会 堺市焼却場コンバインドサイクルあるいは毎日新聞社ガスタービン発電設備 (大阪駅前) と橿原考古学研究所・博物館を組み合わせたバス見学ツアーを検討しております。

※当地は最盛期でもありますので, 早めに宿泊等の参加計画をお考え下さい。

## 第 25 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（幹事団体）と日本機械学会の共催による第 25 回ガスタービン定期講演会を下記のように開催します。会員多数の方々の参加をお願い致します。講演会場は昨年と同じ施設になります。

**開催日時** 1997 年（平成 9 年）5 月 30 日（金）9 時～17 時

**開催場所** 早稲田大学国際会議場 3 階

**所在地** 東京都新宿区戸塚町 1 丁目

早稲田大学西早稲田キャンパス・総合学術センター内

**電 話** 03-3203-4141（大代表）内線 71-5198

**交 通** ・ JR 山手線/西武新宿線高田馬場駅よりスクールバス（早大正門行）、西早稲田下車、徒歩 5 分。

・ 地下鉄東西線早稲田駅より徒歩 10 分（西早稲田キャンパス内を横断）

・ 講演プログラムは次ページをご覧ください。

・ 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下さい。

**参加登録費**（講演論文集代金を含む）

|         |          |
|---------|----------|
| 共催学会正会員 | 6,000 円  |
| 同 学生会員  | 3,000 円  |
| 会員外     | 11,000 円 |

## 参加申し込み方法

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、学会事務局あてにお送り下さい。講演者も参加登録をお願いします。

準備の都合上できるだけ 5 月 15 日（木）までにお申し込み下さい。当日の参加登録も受け付けます。

## 参加登録費の送金方法

下記により 5 月 22 日（木）までにご送金下さい。会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 にてご一報下さい。

・ 郵便振替 No. 00170-9-179578

(社)日本ガスタービン学会

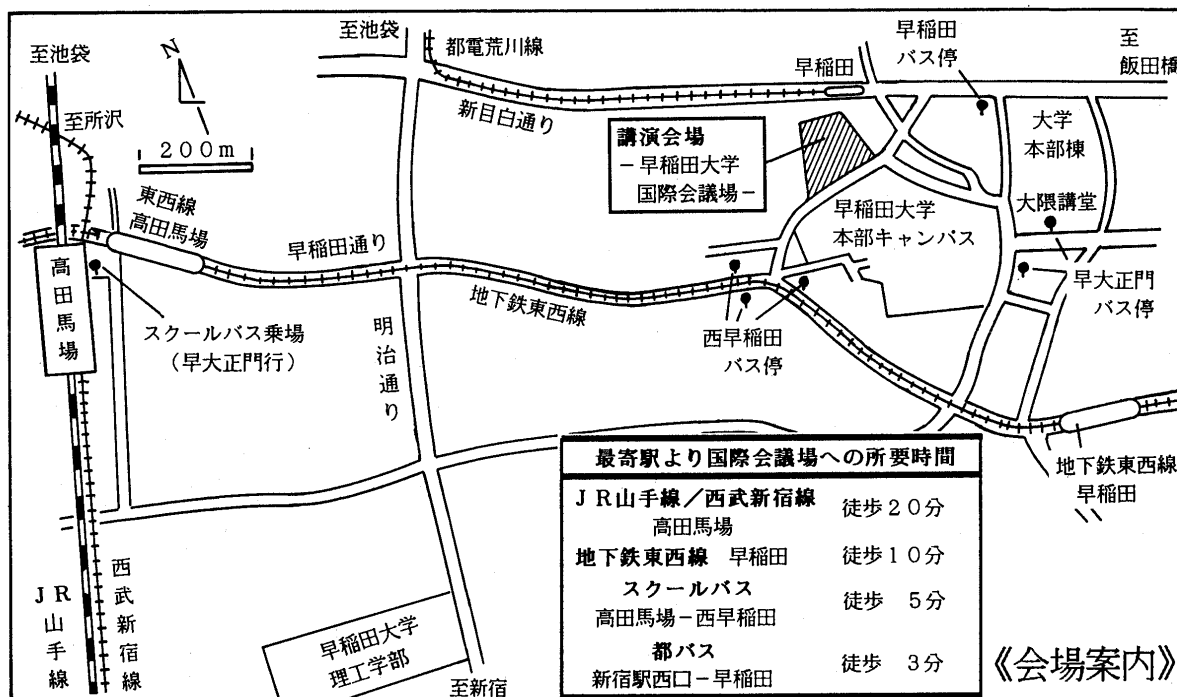
・ 銀行振込 第一勧業銀行西新宿支店、

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下さい。



## 第25回ガスタービン定期講演会プログラム

(一般講演 講演時間15分 討論10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   |                                                                       | 第3室   |                                                                  |
|-------|--------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------|
| 9:30  | 《一般講演》フラッタ                                             | 9:30  | 《ステューデントセッション1》                                                       | 9:30  | 《一般講演》システム                                                       |
| A-1   | 遷音速ファンの高負荷曲げ翼列フラッタに関する実験的研究<br>* 柴田貴範 (東大院)、梶 昭次郎 (東大) | B-1   | 翼内部冷却流路内の流れと熱伝達に関する研究<br>船崎健一 (岩手大)、* 石澤浩平 (岩手大院)、山脇栄道 (石川島播磨)        | C-1   | ジェットエンジンのシステム同定<br>* 杉山 七契 (航技研)                                 |
| A-2   | 遷音速圧縮機翼列の一翼振動時の非定常空力特性<br>* 平野孝典、藤本一郎 (拓大)             | B-2   | 後方ステップ流れの能動制御に関する基礎的研究<br>* 桜井伸隆、本阿弥真治 (東京理科大)                        | C-2   | クローズド蒸気冷却ガスタービンをを用いたコンバインドプラントの部分負荷性能検討<br>* 圓島信也、池口 隆、川池和彦 (日立) |
| A-3   | 遷音速タービン翼列の振動特性<br>* 青塚瑞穂 (東大院)、町田保男、渡辺紀徳 (東大)          | B-3   | 低レイノルズ数域における翼列特性 (第4報：主流乱れの影響)<br>* 村田耕史 (筑波大院)、阿部裕幸、松沼孝幸、筒井康賢 (機械技研) | C-3   | ACC-CAES 発電プラントの概念設計<br>* 幸田栄一、三巻利夫、森塚秀人 (電中研)                   |
| 10:45 |                                                        | 10:45 |                                                                       | 10:45 |                                                                  |
| 10:55 | 《一般講演》CFD                                              | 10:55 | 《一般講演》計測                                                              | 10:55 | 《オーガナイズドセッション》<br>中小型ガスタービンの開発と利用技術                              |
| A-4   | ガスタービン冷却静翼の空力特性<br>* 渋谷直紀、川崎 榮、田沼唯士 (東芝)、山本 悟 (東北大)    | B-4   | ガスサンプリングプローブ内でのCO濃度変化<br>* 山中 矢、山田正彦、小野田昭博 (東芝)                       | C-4   | 航空転用、中小型ガスタービンの利用技術<br>* 井口和春 (荏原製作所)                            |
| A-5   | 回転体内の空気流量特性データの取得<br>広木 強 (熊本工大)、板原寛治、* 寺町健司 (石川島播磨)   | B-5   | イリジウム金属の気化に及ぼす温度、風速および酸素濃度の影響<br>田丸 卓、* 黒沢要治 (航技研)                    | C-5   | 2,000kW 級コジェネレーション用ガスタービン IM270<br>今村龍三、米澤克夫、小林英夫、* 長 義守 (石川島播磨) |
| A-6   | 圧縮機ディスク周りの2次空気流れ解析<br>* 海野 大、山脇栄道、児玉秀和 (石川島播磨)         | B-6   | 超音波翼端すきま計測 (第1報)<br>静特性および低速領域<br>* 田頭 剛、杉山七契、松田幸雄 (航技研)、松木正勝 (日本工大)  | C-6   | M7A-02 ガスタービンの開発<br>* 永井勝史 (川崎重工)                                |
| 12:30 |                                                        | 12:30 |                                                                       | 12:30 |                                                                  |

| 超音速輸送機用推進システム研究開発プロジェクトの現状と展望 |                                                                                              |                             |                                                                                           |                                                                                                  |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13:30                         | 《特別講演》                                                                                       |                             |                                                                                           |                                                                                                  |
| 14:30                         |                                                                                              | 村島 完治 (超音速輸送機用推進システム技術研究組合) |                                                                                           |                                                                                                  |
| 14:50                         | 《一般講演》タービン空力 1                                                                               | 14:50                       | 《一般講演》燃焼 1                                                                                | 14:50                                                                                            |
|                               | A-7 低レイノルズ数域における環状タービン翼列特性 (第2報: 油膜法による流れの可視化)<br>* 松沼孝幸、阿部裕幸 (機械技研)、村田耕史 (筑波大院)、筒井康賢 (機械技研) |                             | B-7 希薄予混合燃焼器モデルの排気特性に関する研究<br>* 高村倫太郎 (慶応大院)、富田洋章、川口 修 (慶応大)                              | 《ステューデントセッション2》<br>C-7 ターボ過給ディーゼルエンジンのマッチング計算に関する研究<br>吉識晴夫 (東大)、* 顧 茸蕾 (東大院)                    |
| 15:40                         | A-8 高負荷・高膨張比タービンの試験研究<br>清水邦弘、* 野上龍馬 (AMG)                                                   |                             | B-8 高圧場における予混合火炎の燃焼振動解析<br>* 大塚雅哉、吉田正平、室田知也、平田義隆、小林成嘉 (日立)                                | C-8 超音速矩形ジェットの構造とスクリーチ音に対する縦渦の作用<br>* 木分孝幸 (早大院)、大田英輔 (早大)、生沼秀司、五味 努、小林 紘 (航技研)                  |
| 15:50                         | 《一般講演》タービン空力 2                                                                               | 15:40<br>15:50              | B-9 Vitiated Air における NOx 排出特性<br>黒沢要治、* 鈴木和雄、下平一雄 (航技研)                                  | 《一般講演》セラミックス材料<br>C-9 ガスタービンへの適用を目指した高靱性セラミックス長繊維複合材料の開発<br>浅山雅弘、* 伊藤義康 (東芝)、池田 誠 (東芝電子エンジニアリング) |
|                               | A-9 多段軸流タービン3次元非定常内部流動の基礎研究<br>山本孝正、臼井 弘 (航技研)、大田英輔 (早大) 渡辺裕章、* 稲葉 亨、山口 淳、長谷川 晃、富永純一 (早大院)   | 16:05<br>16:10              | 《一般講演》燃焼 2<br>B-10 2重旋回形燃焼器要素の研究 (第1報)<br>* 田丸 卓、黒沢要治、下平一雄 (航技研)、林 光一 (青山大)、渡辺浩司 (青山大院)   | C-10 産業用ガスタービンの高温部品への熱遮へいコーティングの適用<br>* 守屋慶一、河合久孝、高橋孝二 (三菱重工)、橋本英雄、下村慶一 (東北電力)                   |
|                               | A-10 高圧タービン非定常段解析<br>* 平井健二、児玉秀和 (石川島播磨)、田村 敦宏、菊地一雄、野崎 理 (航技研)                               |                             | B-11 コージェネ用ガスタービン低 NOx 液焚き燃焼器の研究、開発<br>* 石川康弘、細井 潤、藤 秀実 (石川島播磨)                           | C-11 CGT セラミック部品の設計開発<br>* 大橋一生、伊藤吉幸 (ヤンマーディーゼル)                                                 |
| 17:05                         | A-11 周期的後流の影響を受ける境界層での空力損失に関する研究<br>* 船崎健一 (岩手大)、小泉一幸 (東北真空技術)                               | 17:30                       | B-12 フリージェット試験用メタン燃料ラム燃焼器の研究 (第2報 フリージェット試験結果)<br>* 木下康裕、小田剛生、北嶋潤一、藤原賢治 (川崎重工)、三谷 徹 (航技研) | C-12 自動車用 100kW CGT の回転蓄熱式熱交換器の開発<br>* 赤尾好之、中沢則雄、稲葉志津雄、辜 敬之、小池哲哉 (日本自動車研)                        |

## 「ガスタービンの高温化と冷却技術に関する調査研究」成果報告書刊行のお知らせ

1994年から標記の調査研究を行い、その成果報告書を印刷製本の形で刊行することになりました。近年、ガスタービンの高温化による熱効率の向上と比出力の増大は、航空用、産業用ともに目覚ましい進展を遂げています。調査研究委員会は、この分野で基礎研究、研究開発、運用に携わっているメンバー（委員長 吉田豊明〔航技研〕、委員18名、協力者約10名）で構成し、技術の現状と動向について調査、討論を行いました。

以下は、その結果をまとめた報告書の概要です。会員の皆さんには是非とも購読いただきますようご案内申し上げます。

## 主な内容

高温化と冷却技術総論  
内部冷却技術

外部熱伝達と遮熱  
新冷却システム  
周辺技術（設計、実験、計測、検査など）  
最先端エンジンの超高温化技術

## 編集の基本方針

各項を基礎、現状先端技術、将来展望で構成  
機械/航空系学生にも理解できること  
GT関係者のガイドブック的であること  
専門家の総括的基礎資料であること

体 裁 A4版、約250ページ、オフセット印刷

価 格 一部 5,000円（送料込）

刊行時期 1997年3月

申込方法 本誌巻末の申込書により学会事務局までお申し込み下さい。

## 日本ガスタービン学会名簿 [1997年版] 頒布のお知らせ

本会では会員相互の交流・情報交換をより一層充実することを目的に3年毎に会員名簿を発行しておりますが、この程、1997年版が完成いたしましたので右記により頒布いたします。なお、新名簿には会員の電子メールアドレスを追加し、利用価値を向上してあります。

1. 頒布実費 一部 3,500円（送料込み）
2. 申込方法 添付申込書に名前、住所、電話番号、申し込み部数を記入の上FAXまたは郵送にて事務局までお申し込み下さい。

## 平成9年度会費納入のお願い

平成9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ている方は、平成9年度は平成9年4月23日に貴口座に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  |

郵便振替 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、3月20日迄に事務局宛お送り下さい。自動振替を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。

学会事務局 〒160 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

## 「ガスタービンの高温化と冷却技術に関する調査研究」成果報告書刊行のお知らせ

1994年から標記の調査研究を行い、その成果報告書を印刷製本の形で刊行することになりました。近年、ガスタービンの高温化による熱効率の向上と比出力の増大は、航空用、産業用ともに目覚ましい進展を遂げています。調査研究委員会は、この分野で基礎研究、研究開発、運用に携わっているメンバー（委員長 吉田豊明〔航技研〕、委員18名、協力者約10名）で構成し、技術の現状と動向について調査、討論を行いました。

以下は、その結果をまとめた報告書の概要です。会員の皆さんには是非とも購読いただきますようご案内申し上げます。

## 主な内容

高温化と冷却技術総論  
内部冷却技術

外部熱伝達と遮熱  
新冷却システム  
周辺技術（設計、実験、計測、検査など）  
最先端エンジンの超高温化技術

## 編集の基本方針

各項を基礎、現状先端技術、将来展望で構成  
機械/航空系学生にも理解できること  
GT関係者のガイドブック的であること  
専門家の総括的基礎資料であること

体 裁 A4版、約250ページ、オフセット印刷

価 格 一部 5,000円（送料込）

刊行時期 1997年3月

申込方法 本誌巻末の申込書により学会事務局までお申し込み下さい。

## 日本ガスタービン学会名簿 [1997年版] 頒布のお知らせ

本会では会員相互の交流・情報交換をより一層充実することを目的に3年毎に会員名簿を発行しておりますが、この程、1997年版が完成いたしましたので右記により頒布いたします。なお、新名簿には会員の電子メールアドレスを追加し、利用価値を向上してあります。

1. 頒布実費 一部 3,500円（送料込み）
2. 申込方法 添付申込書に名前、住所、電話番号、申し込み部数を記入の上FAXまたは郵送にて事務局までお申し込み下さい。

## 平成9年度会費納入のお願い

平成9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ている方は、平成9年度は平成9年4月23日に貴口座に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  |

郵便振替 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、3月20日迄に事務局宛お送り下さい。自動振替を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。

学会事務局 〒160 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

## 「ガスタービンの高温化と冷却技術に関する調査研究」成果報告書刊行のお知らせ

1994年から標記の調査研究を行い、その成果報告書を印刷製本の形で刊行することになりました。近年、ガスタービンの高温化による熱効率の向上と比出力の増大は、航空用、産業用ともに目覚ましい進展を遂げています。調査研究委員会は、この分野で基礎研究、研究開発、運用に携わっているメンバー（委員長 吉田豊明〔航技研〕、委員18名、協力者約10名）で構成し、技術の現状と動向について調査、討論を行いました。

以下は、その結果をまとめた報告書の概要です。会員の皆さんには是非とも購読いただきますようご案内申し上げます。

## 主な内容

高温化と冷却技術総論  
内部冷却技術

外部熱伝達と遮熱  
新冷却システム  
周辺技術（設計、実験、計測、検査など）  
最先端エンジンの超高温化技術

## 編集の基本方針

各項を基礎、現状先端技術、将来展望で構成  
機械/航空系学生にも理解できること  
GT関係者のガイドブック的であること  
専門家の総括的基礎資料であること

体 裁 A4版、約250ページ、オフセット印刷

価 格 一部 5,000円（送料込）

刊行時期 1997年3月

申込方法 本誌巻末の申込書により学会事務局までお申し込み下さい。

## 日本ガスタービン学会名簿 [1997年版] 頒布のお知らせ

本会では会員相互の交流・情報交換をより一層充実することを目的に3年毎に会員名簿を発行しておりますが、この程、1997年版が完成いたしましたので右記により頒布いたします。なお、新名簿には会員の電子メールアドレスを追加し、利用価値を向上してあります。

1. 頒布実費 一部 3,500円（送料込み）
2. 申込方法 添付申込書に名前、住所、電話番号、申し込み部数を記入の上FAXまたは郵送にて事務局までお申し込み下さい。

## 平成9年度会費納入のお願い

平成9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ている方は、平成9年度は平成9年4月23日に貴口座に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  |

|      |                |
|------|----------------|
| 郵便振替 | 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、3月20日迄に事務局宛お送り下さい。自動振替を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。

学会事務局 〒160 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

## 英文技術論文の扱いの変更について

本学会では、投稿技術論文は校閲を経て学会誌に掲載されること、使用言語は日本語に限ることが、技術論文投稿規定<sup>1)</sup>により定められています。一方、英文技術論文については、1993年に英文技術論文投稿規定<sup>2)</sup>が定められ、同年4月から、英文技術論文の種類をa.外国人会員によるオリジナル英文技術論文 b.学会誌に掲載された技術論文を英訳した論文の2種類とし、有料でBulletin of GTSJに掲載することになっています。

今期第21期理事会では、Bulletin of GTSJのあり方を検討するなかで、Bulletinを掲載誌としてきた英文論文についても審議し、和文技術論文を英文化しBulletinに掲載する制度は廃止すること、外国人会員によるオリジナル技術論文は学会誌に掲載すること、この場合英文による執筆を認めることを承認しました。これに伴って、技術論文投稿規定を改訂するとともに、従来の英文技術論文投稿規定は廃止することになりました。なお技術論文投稿規定の改訂にあたっては、原稿執筆要領に記載さ

れていたカラーページの扱い<sup>3)</sup>についても条文に加えることになりました。今回改訂された技術論文投稿規定は本号巻末に掲載しますのでご覧下さい。

注1) 学会誌巻末に毎号掲載

2) 学会誌1993年3月号および9月号会告

3) 学会誌1992年3月号

## Bulletin of GTSJの有料頒布について

Bulletin of GTSJは昨年度まで数年間にわたって全会員に無料で配布してきましたが、今期から会員個人への無料配布は行わず、希望者に有料で頒布することになりました。価格は1部2000円(送料とも)です。ご希望の方は、巻末の申込書により学会事務所までお申し込み下さい。なお、賛助会員には1部を無料で送付します。

## GTSJ 第21期委員名簿

## 組織検討委員会

高田 浩之(東海大)

伊藤 高根(東海大)

大田 英輔(早大)

有賀 一郎(千葉大)

田中英穂

葉山 眞治(東大)

平山 直道

## 選挙管理委員会(追加)

藤原 仁志(航技研)

## ▶ 入会者名簿 ◀

## 正会員

中田 裕二(東芝) 松山 良満(石川島播磨)

鈴木 健二郎(京都大学) 大原 武光(東京電機)

寺田 稔(A B B) 佐々木 奉昭(ダイニセル)

伊東 弘一(大阪府庁) 永島 俊三郎(早稲田大学)

田岸 昭宣(日立製作所) 酒井 裕二(東京電機)

CLAUDIO BRUNO(ローマ大学) 佐藤 文夫(東芝)

小林 重男(東京電機) 岡本 洋三(東京ガス)

大坂 卓也 藤原 仁志(航空宇宙)

## 学生会員

黛 克憲(法政大学)

## 賛助会員

(財)先端建設技術センター

(株)クボタ



## 英文技術論文の扱いの変更について

本学会では、投稿技術論文は校閲を経て学会誌に掲載されること、使用言語は日本語に限ることが、技術論文投稿規定<sup>1)</sup>により定められています。一方、英文技術論文については、1993年に英文技術論文投稿規定<sup>2)</sup>が定められ、同年4月から、英文技術論文の種類をa.外国人会員によるオリジナル英文技術論文 b.学会誌に掲載された技術論文を英訳した論文の2種類とし、有料でBulletin of GTSJに掲載することになっています。

今期第21期理事会では、Bulletin of GTSJのあり方を検討するなかで、Bulletinを掲載誌としてきた英文論文についても審議し、和文技術論文を英文化しBulletinに掲載する制度は廃止すること、外国人会員によるオリジナル技術論文は学会誌に掲載すること、この場合英文による執筆を認めることを承認しました。これに伴って、技術論文投稿規定を改訂するとともに、従来の英文技術論文投稿規定は廃止することになりました。なお技術論文投稿規定の改訂にあたっては、原稿執筆要領に記載さ

れていたカラーページの扱い<sup>3)</sup>についても条文に加えることになりました。今回改訂された技術論文投稿規定は本号巻末に掲載しますのでご覧下さい。

注1) 学会誌巻末に毎号掲載

2) 学会誌1993年3月号および9月号会告

3) 学会誌1992年3月号

## Bulletin of GTSJの有料頒布について

Bulletin of GTSJは昨年度まで数年間にわたって全会員に無料で配布してきましたが、今期から会員個人への無料配布は行わず、希望者に有料で頒布することになりました。価格は1部2000円(送料とも)です。ご希望の方は、巻末の申込書により学会事務所までお申し込み下さい。なお、賛助会員には1部を無料で送付します。

## GTSJ 第21期委員名簿

## 組織検討委員会

高田 浩之(東海大)

伊藤 高根(東海大)

大田 英輔(早大)

有賀 一郎(千葉大)

田中英穂

葉山 眞治(東大)

平山 直道

## 選挙管理委員会(追加)

藤原 仁志(航技研)

## ▶ 入会者名簿 ◀

## 正会員

中田 裕二(東芝) 松山 良満(石川島播磨)

鈴木 健二郎(京都大学) 大原 武光(東京電機)

寺田 稔(A B B) 佐々木 奉昭(ダイニセツ)

伊東 弘一(大阪府庁) 永島 俊三郎(早稲田大学)

田岸 昭宣(日立製作所) 酒井 裕二(東京電機)

CLAUDIO BRUNO(ローマ大学) 佐藤 文夫(東芝)

小林 重男(東京電機) 岡本 洋三(東京ガス)

大坂 卓也 藤原 仁志(航空宇宙)

## 学生会員

黛 克憲(法政大学)

## 賛助会員

(財)先端建設技術センター

(株)クボタ

## 英文技術論文の扱いの変更について

本学会では、投稿技術論文は校閲を経て学会誌に掲載されること、使用言語は日本語に限ることが、技術論文投稿規定<sup>1)</sup>により定められています。一方、英文技術論文については、1993年に英文技術論文投稿規定<sup>2)</sup>が定められ、同年4月から、英文技術論文の種類をa.外国人会員によるオリジナル英文技術論文 b.学会誌に掲載された技術論文を英訳した論文の2種類とし、有料でBulletin of GTSJに掲載することになっています。

今期第21期理事会では、Bulletin of GTSJのあり方を検討するなかで、Bulletinを掲載誌としてきた英文論文についても審議し、和文技術論文を英文化しBulletinに掲載する制度は廃止すること、外国人会員によるオリジナル技術論文は学会誌に掲載すること、この場合英文による執筆を認めることを承認しました。これに伴って、技術論文投稿規定を改訂するとともに、従来の英文技術論文投稿規定は廃止することになりました。なお技術論文投稿規定の改訂にあたっては、原稿執筆要領に記載さ

れていたカラーページの扱い<sup>3)</sup>についても条文に加えることになりました。今回改訂された技術論文投稿規定は本号巻末に掲載しますのでご覧下さい。

注1) 学会誌巻末に毎号掲載

2) 学会誌1993年3月号および9月号会告

3) 学会誌1992年3月号

## Bulletin of GTSJの有料頒布について

Bulletin of GTSJは昨年度まで数年間にわたって全会員に無料で配布してきましたが、今期から会員個人への無料配布は行わず、希望者に有料で頒布することになりました。価格は1部2000円(送料とも)です。ご希望の方は、巻末の申込書により学会事務所までお申し込み下さい。なお、賛助会員には1部を無料で送付します。

## GTSJ 第21期委員名簿

## 組織検討委員会

高田 浩之(東海大)

伊藤 高根(東海大)

大田 英輔(早大)

有賀 一郎(千葉大)

田中英穂

葉山 眞治(東大)

平山 直道

## 選挙管理委員会 (追加)

藤原 仁志(航技研)

## ▶ 入会者名簿 ◀

## 正会員

中田 裕二(東芝) 松山 良満(石川島播磨)  
鈴木 健二郎(京都大学) 大原 武光(東京電機)  
寺田 稔(A B B) 佐々木 奉昭(ダイセル)  
伊東 弘一(大阪府庁) 永島 俊三郎(早稲田大学)  
田岸 昭宣(日立製作所) 酒井 裕二(東京電機)  
CLAUDIO BRUNO(ローマ大学) 佐藤 文夫(東芝)

小林 重男(東京電機) 岡本 洋三(東京ガス)  
大坂 卓也 藤原 仁志(航空宇宙)

## 学生会員

黛 克憲(法政大学)

## 賛助会員

(財)先端建設技術センター

(株)クボタ

## 英文技術論文の扱いの変更について

本学会では、投稿技術論文は校閲を経て学会誌に掲載されること、使用言語は日本語に限ることが、技術論文投稿規定<sup>1)</sup>により定められています。一方、英文技術論文については、1993年に英文技術論文投稿規定<sup>2)</sup>が定められ、同年4月から、英文技術論文の種類をa.外国人会員によるオリジナル英文技術論文 b.学会誌に掲載された技術論文を英訳した論文の2種類とし、有料でBulletin of GTSJに掲載することになっています。

今期第21期理事会では、Bulletin of GTSJのあり方を検討するなかで、Bulletinを掲載誌としてきた英文論文についても審議し、和文技術論文を英文化しBulletinに掲載する制度は廃止すること、外国人会員によるオリジナル技術論文は学会誌に掲載すること、この場合英文による執筆を認めることを承認しました。これに伴って、技術論文投稿規定を改訂するとともに、従来の英文技術論文投稿規定は廃止することになりました。なお技術論文投稿規定の改訂にあたっては、原稿執筆要領に記載さ

れていたカラーページの扱い<sup>3)</sup>についても条文に加えることになりました。今回改訂された技術論文投稿規定は本号巻末に掲載しますのでご覧下さい。

注1) 学会誌巻末に毎号掲載

2) 学会誌1993年3月号および9月号会告

3) 学会誌1992年3月号

## Bulletin of GTSJの有料頒布について

Bulletin of GTSJは昨年度まで数年間にわたって全会員に無料で配布してきましたが、今期から会員個人への無料配布は行わず、希望者に有料で頒布することになりました。価格は1部2000円(送料とも)です。ご希望の方は、巻末の申込書により学会事務所までお申し込み下さい。なお、賛助会員には1部を無料で送付します。

## GTSJ 第21期委員名簿

## 組織検討委員会

高田 浩之(東海大)

伊藤 高根(東海大)

大田 英輔(早大)

有賀 一郎(千葉大)

田中英穂

葉山 眞治(東大)

平山 直道

## 選挙管理委員会(追加)

藤原 仁志(航技研)

## ▶ 入会者名簿 ◀

## 正会員

中田 裕二(東芝) 松山 良満(石川島播磨)

鈴木 健二郎(京都大学) 大原 武光(東京電機)

寺田 稔(A B B) 佐々木 奉昭(ダイニセツ)

伊東 弘一(大阪府庁) 永島 俊三郎(早稲田大学)

田岸 昭宣(日立製作所) 酒井 裕二(東京電機)

CLAUDIO BRUNO(ローマ大学) 佐藤 文夫(東芝)

小林 重男(東京電機) 岡本 洋三(東京ガス)

大坂 卓也 藤原 仁志(航空宇宙)

## 学生会員

黛 克憲(法政大学)

## 賛助会員

(財)先端建設技術センター

(株)クボタ

## 平成 9 年度第 1 回見学会・技術懇談会のお知らせ

平成 9 年度第 1 回見学会・技術懇談会を下記の要領で開催いたします。今回は、つくば研究都市の国立研究所を中心にガスタービン関係の見学を行います。見学開催日は東京で開催されるガスタービン定期講演会の前日を設定して、講演会と連続して参加できるように計画しました。奮ってご参加下さい。

1. 日 時: 平成 9 年 5 月 29 日(木) 9:00~18:30

2. 見 学 先: 工業技術院機械技術研究所  
科学技術庁金属材料技術研究所  
日本自動車研究所

3. スケジュール:

8:45 東京駅(八重洲口)集合  
9:00 東京駅発(往復、つくば内移動に貸切バス使用)

10:00~11:30 機械技術研究所見学

11:30~12:00 技術懇談会

「国家 PJ WE-NET 開発状況」  
濱純氏(機械技術研究所室長)

12:00~13:00 昼食(機械技術研究所にて)

13:00~15:00 金属材料研究所

18:30 東京駅着

4. 参加要領

- 1) 定員 50 名(定員超過の場合は抽選, 全員にお知らせします。)
- 2) 申込方法: 下記申込書にご記入の上 FAX 又は郵送にて学会事務局へお送り下さい。
- 3) 参加費: 6,000 円  
当日お支払い下さい。

## 見学会参加申込書

(平成 9 年 5 月 29 日)

(社) 日本ガスタービン学会 行  
FAX 03-3365-0387 TEL 03-3365-0095

|     |  |     |  |
|-----|--|-----|--|
| 氏 名 |  |     |  |
| 連絡先 |  |     |  |
| 〒   |  |     |  |
| TEL |  | FAX |  |

名簿・Bulletin・成果報告書 申込書

(社)日本ガスタービン学会 行  
 FAX 03-3365-0387 TEL 03-3365-0095

|     |  |     |  |
|-----|--|-----|--|
| 氏 名 |  |     |  |
| 連絡先 |  |     |  |
| 〒   |  |     |  |
| TEL |  | FAX |  |

※購入希望に○印をおつけ下さい

|   |              | 単 価    | 希望部数 | 計 |
|---|--------------|--------|------|---|
|   | 会員名簿(1997年版) | ¥3,500 |      |   |
|   | Bulletin     | ¥2,000 |      |   |
|   | 成果報告書        | ¥5,000 |      |   |
| 計 |              |        |      |   |

【事務局への連絡事項】

\*送金方法 (○印をつけて下さい) 送金予定日 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

\*請求書の発行について

- 要 宛名 ( )
- 不要

\*領収書の発行について

- 要 宛名 ( )
- 不要

# 第25回ガスタービン定期講演会

(平成9年5月30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下さい。)

| フリガナ<br>氏 名 | 所 属 | TEL<br>FAX | 所属学協会<br>GTSJの会員<br>No. をご記入下さい | 懇親会出席<br>の有無<br>〇印をつけて下さい |
|-------------|-----|------------|---------------------------------|---------------------------|
|             |     |            |                                 | 出・欠                       |
|             |     |            |                                 | 出・欠                       |
|             |     |            |                                 | 出・欠                       |
|             |     |            |                                 | 出・欠                       |
|             |     |            |                                 | 出・欠                       |

### 【事務局への連絡事項】

\*送金方法 (〇印をつけて下さい) 参加費送金予定日 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
- 当日受付にて支払

\*請求書の発行について

- 要 宛名 ( )
- 不要

\*領収書の発行について

- 要 宛名 ( )
- 不要

## 編集 後記

97年3月号の原稿の締め切りは、96年の年末年始の忙しい時期に当たり、また執筆者の一人の方が体調をこわされ入院されるというトラブルもあり、原稿の集まり具合が心配されましたが、皆様のご協力のおかげで、無事仕上げることができました。

本号の特集テーマである「ターボチャージャ」については、87年と91年の過去2回特集を組み、その当時の技術動向について解説してもらいましたが、それから約6年経過していますので、再び特集を組む丁度良い時期ではないかと思えます。

特集号の名前を、生産統計資料で使用しているように「過給機」とするか、先の特集号にならって「ターボチャージャ」にするか迷いました。過給機は、機械駆動過給（スーパーチャージャ）と排気タービン駆動式過給（ターボチャージャ）の二つに分けられます。機械駆動過給は、エンジンの出力軸から歯車やベルトを介して、過給機を駆動させるものであり、これに対して排気タービン駆動式過給は、排気エネルギーでタービンを回転させます。今回、解説されている過給機は、「ターボチャージャ」ということで、この名前が編集委員会です承されました。学会内で扱う過給機は現状では「ターボチャージャ」に限っているのので、用語を「ターボチャージャ」に統一したほうが良いかもしれません。

「ターボチャージャ」は、タービン及びコンプレッサの組み合わせで構成されている単純な回転機械で、それ単独で完結しているものではなく、エンジンがあって初めて役に立つ機械であります。そのため、今回は、特に

エンジン（ディーゼル、自動車用、トラック用等）と「ターボチャージャ」との関わり合いについて詳しく解説をしてもらいました。また、新技術の紹介として、「ターボチャージャの技術応用展開」と「セラミックターボの量産技術について」の解説を加えました。ガスタービンとターボチャージャの違いは、「ターボチャージャの技術応用展開」に述べられていますが、タービン入口温度がかなり高いということや高負荷での運転という点では、ガスタービンの方が技術的に難しいのかもしれませんが。しかし、「ターボチャージャ」もタービン入口の温度と圧力の変動やエンジンとのマッチング等の異なる面で難しさを持っています。

ガスタービン学会はガスタービンおよび過給機（ターボチャージャ）の技術を扱っていますが、過給機は学会員の皆様にはあまりなじみのないものかもしれません。本特集号によって、「ターボチャージャ」技術の魅力を身近なものに感じていただければ幸いです。

最後になりましたが、執筆者の方々をはじめ、関係者の皆様に対して、感謝申し上げます。尚、本号の企画は、中沢理事、佐々木委員、山本委員と小野里が担当いたしました。（小野里 久）

### <表紙写真>

#### ラジアルタービン動翼の3次元流動解析結果

説明: ガスタービン用ラジアルタービン動翼の3次元定常流解析結果。図は動翼入り口から出口下流までの5断面における相対流速分布を示している。

(提供 三菱重工)

だより

## ♣事務局 ☒ ♣

東京は暖冬とはいってもインフルエンザ大流行でここ事務局も戦々恐々ですが、今のところ何とか逃れています。でもいつも少しずつ波に乗り遅れている事務局のこと、1ヶ月遅れ位で、やってくるかもしれません。この学会誌が皆様のお手元に届く頃には終了しているのですが、とにかく今はシンポジウム、フォーラムの準備、手配、そして評議員選挙開票の準備、会員名簿発行の手配、来年度予算と今年度決算の準備と数え上げれば次々と出てくる事に追われ“イソジン”片手にウガイをしながら毎日過ごしています。

さて、今年度もあと1ヶ月余。この“事務局だより”を読んで下さっている方はほとんど96年分会費納入済みと思われるかもしれませんがもしもまだの方は可及的速やかにご送金下さい。そしてその際は是非銀行口座自動引落としの手続をおとり下さいますよう。用紙が手元にないなどご不明の

点ございましたら何なりと事務局までお問い合わせ下さい。

準備中といえど先ほどいくつか挙げた他に巻末会告にもございますように秋季講演会があります。

今秋は奈良市の新公会堂という県立の新しい立派な会場を使うことになりました。又、懇親会の場所もいろいろ頭を悩ました結果、近くの春日大社の景雲殿を使わせていただくことに決まり手続等をしているところです。古都奈良ならではの秋季講演会になることと思いますので是非たくさんの方々に参加していただきたいと思っておりますが、なにぶんにも観光シーズンまっさかりの10月です、宿の確保をお早目になさることをおすすめします。

そろそろ花粉が舞う季節になって来ました。今年はまた例年になく多くなりそうとか。インフルエンザは避けられてもこの花粉からは逃げられないと覚悟を決めて春を迎えることにいたしましょう。[A]

## 編集後記

97年3月号の原稿の締め切りは、96年の年末年始の忙しい時期に当たり、また執筆者の一人の方が体調をこわされ入院されるというトラブルもあり、原稿の集まり具合が心配されましたが、皆様のご協力のおかげで、無事仕上げることができました。

本号の特集テーマである「ターボチャージャ」については、87年と91年の過去2回特集を組み、その当時の技術動向について解説してもらいましたが、それから約6年経過していますので、再び特集を組む丁度良い時期ではないかと思えます。

特集号の名前を、生産統計資料で使用しているように「過給機」とするか、先の特集号にならって「ターボチャージャ」にするか迷いました。過給機は、機械駆動過給（スーパーチャージャ）と排気タービン駆動式過給（ターボチャージャ）の二つに分けられます。機械駆動過給は、エンジンの出力軸から歯車やベルトを介して、過給機を駆動させるものであり、これに対して排気タービン駆動式過給は、排気エネルギーでタービンを回転させます。今回、解説されている過給機は、「ターボチャージャ」ということで、この名前が編集委員会です承されました。学会内で扱う過給機は現状では「ターボチャージャ」に限っているのので、用語を「ターボチャージャ」に統一したほうが良いかもしれません。

「ターボチャージャ」は、タービン及びコンプレッサの組み合わせで構成されている単純な回転機械で、それ単独で完結しているものではなく、エンジンがあって初めて役に立つ機械であります。そのため、今回は、特に

エンジン（ディーゼル、自動車用、トラック用等）と「ターボチャージャ」との関わり合いについて詳しく解説をしてもらいました。また、新技術の紹介として、「ターボチャージャの技術応用展開」と「セラミックターボの量産技術について」の解説を加えました。ガスタービンとターボチャージャの違いは、「ターボチャージャの技術応用展開」に述べられていますが、タービン入口温度がかなり高いということや高負荷での運転という点では、ガスタービンの方が技術的に難しいのかもしれませんが。しかし、「ターボチャージャ」もタービン入口の温度と圧力の変動やエンジンとのマッチング等の異なる面で難しさを持っています。

ガスタービン学会はガスタービンおよび過給機（ターボチャージャ）の技術を扱っていますが、過給機は学会員の皆様にはあまりなじみのないものかもしれません。本特集号によって、「ターボチャージャ」技術の魅力を身近なものに感じていただければ幸いです。

最後になりましたが、執筆者の方々をはじめ、関係者の皆様に対して、感謝申し上げます。尚、本号の企画は、中沢理事、佐々木委員、山本委員と小野里が担当いたしました。（小野里 久）

### <表紙写真>

#### ラジアルタービン動翼の3次元流動解析結果

説明: ガスタービン用ラジアルタービン動翼の3次元定常流解析結果。図は動翼入り口から出口下流までの5断面における相対流速分布を示している。

（提供 三菱重工）

だより

## ♣事務局 ☒ ♣

東京は暖冬とはいってもインフルエンザ大流行でここ事務局も戦々恐々ですが、今のところ何とか逃れています。でもいつも少しずつ波に乗り遅れている事務局のこと、1ヶ月遅れ位で、やってくるかもしれません。この学会誌が皆様のお手元に届く頃には終了しているのですが、とにかく今はシンポジウム、フォーラムの準備、手配、そして評議員選挙開票の準備、会員名簿発行の手配、来年度予算と今年度決算の準備と数え上げれば次々と出てくる事に追われ“イソジン”片手にウガイをしながら毎日過ごしています。

さて、今年度もあと1ヶ月余。この“事務局だより”を読んで下さっている方はほとんど96年分会費納入済みと思われるかもしれませんがもしもまだの方は可及的速やかにご送金下さい。そしてその際は是非銀行口座自動引落としの手続をおとり下さいますよう。用紙が手元にないなどご不明の

点ございましたら何なりと事務局までお問い合わせ下さい。

準備中といえど先ほどいくつか挙げた他に巻末会告にもございますように秋季講演会があります。

今秋は奈良市の新公会堂という県立の新しい立派な会場を使うことになりました。又、懇親会の場所もいろいろ頭を悩ました結果、近くの春日大社の景雲殿を使わせていただくことに決まり手続等をしているところです。古都奈良ならではの秋季講演会になることと思いますので是非たくさんの方々に参加していただきたいと思っておりますが、なにぶんにも観光シーズンまっさかりの10月です、宿の確保をお早目になさることをおすすめします。

そろそろ花粉が舞う季節になって来ました。今年はまた例年になく多くなりそうとか。インフルエンザは避けられてもこの花粉からは逃げられないと覚悟を決めて春を迎えることにいたしましょう。[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、は、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 東京都港区西新橋1-17-5  
Tel. 03-3508-9061 Fax. 03-3580-9217  
ニッセイエブプロ(株) 制作部編集室  
ガスタービン学会誌担当 越司 昭

## 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、ガスタービン及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って執筆し、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. 24 No. 96 1997.3

発行日 1997年3月10日  
発行所 社団法人 日本ガスタービン学会  
編集者 菅 進  
発行者 大槻幸雄  
〒160 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 ニッセイエブプロ(株)  
〒105 東京都港区西新橋2-5-10  
Tel. 03-3501-5151 Fax. 03-3501-5717

©1997, (株)日本ガスタービン学会  
複写をされる方に 本誌に掲載された著作物を複写する場合は、次の団体から許諾を受けて下さい。  
〒107 東京都港区赤坂9-6-41 (株)日本工学会内  
学協会著作権協議会  
Tel. 03-3475-4621 Fax. 03-3403-1738