

ガスタービンと歩んだ46年

谷村 篤秀^{*1}

TANIMURA Atsuhide

1953年に京都大学理学部物理学科を卒業し、川崎機械工業(株)〈現川崎重工業(株)の前身〉に入社、以来1999年7月に子会社川重明石エンジニアリング(株)を退社するまで、46年間に陸海空用のガスタービンエンジン一筋に取り組んで過ごしてきました。この間を振り返ってみますと、社名も川崎航空機から川崎重工業と変わりましたし、職制の名称も肩書きも数え切れないほど変わってきましたが、常に航空機用ガスタービンエンジン・ジェットエンジンや産業用・船舶用ガスタービンの仕事それも技術関係に携わってきました。

今にして思い返してみますと、この半世紀近くの間、幾多のつらい思い、悲しいことや残念であった出来事もありましたが、それも今となってはその一つ一つがガスタービン事業を立ち上げていく歴史であって、関連した事象も人も全てが懐かしく思い出されます。

我々の、いや世界のガスタービンは航空用エンジンの技術によって先導されたといって過言ではないと思います。私が入社した当時の日本の航空機産業の状況は、1952年8月にそれまで禁止されていた航空機製造が許可され、関係各社が一斉に航空機産業の復活に乗り出しました。同年7月には航空機製造法が公布され、1953年1月には「ジェット機試作の促進」プロジェクト発足が航空機試作促進審議会から答申されました。この動きに呼応して、それまでの合同研究グループが発展解消され、日本ジェットエンジン(株)が7月に設立されました。当初のメンバーは三菱重工・石川島重工・富士重工・富士精密の各社が参加していました。当時私たちは川崎重工グループ内で小型のガスタービンを試作研究していましたが、我社川崎航空機も1956年より日本ジェット(株)に参加することとなり、私もその一員として設計部に派遣されました。

このプロジェクトは戦後の日本が、世界の最先端技術のかたまりとみなされていたジェットエンジンにチャレンジしたということです。また航空エンジン事業に乗り出そうとした国内の全メーカーが参加し、共同体制を組んで開発に一致協力したという点でも画期的な出来事であり、その後のガスタービンの開発にも大きな影響を与えたといえます。こうして開発されたJ3エンジンは、設

計・加工から材料・試験にいたるまで全てわが国独自の力によって推進され、圧縮機の破損など多くの失敗を重ねながらも苦難を乗り越えて、1959年より量産にこぎつけ、T-1Aジェット練習機に搭載されました。

私個人としてもこの仕事に参加出来たことにより、当時の日本のトップレベルの先生方・先輩・同僚から多くの知識を学ぶことが出来たと共に、若いときに共同開発を体験し、技術者の一体感・信頼感を持つことが出来たことは得がたい体験でありましたし、その後の多くの国内・国外での共同開発に役立てることが出来ました。又この時築かれた交友はいまなお続いております。

一方、川崎重工は、1954年に米極東空軍のジェットエンジンのオーバーホール契約を締結し、ロッキード社と技術提携して工場を建設しJ33・J35・J47ジェットエンジンのオーバーホール業務を極東地域で初めて開始しました。私は1959年に日本ジェットエンジン(株)より復帰してこれに従事しました。このオーバーホール業務を通じて習得したことは、完備した設計基準・製造工程規格・材料スペック・品質管理等各種のマニュアルに基づくハイテクエンジン製作・整備のノウハウの取得でした。また米軍の厳しい監督検査の下でオーバーホールを遂行することによって、工場の設備が整備されると共に徹底した教育によって、従業員のスキルと品質意識が格段に高まりました。

米軍のエンジンに引き続き、1959年に防衛庁のT-1Bジェット練習機用オリフューズエンジンのオーバーホール契約をロールスロイス社と、1963年にはHU-1B中型ヘリコプタ用T53型1000馬力クラスターボシャフトエンジンをライカミング社と、1965年に無人ヘリコプタ用B502型300馬力クラスエンジンについてボーイング社と締結しました。

これらのエンジンのオーバーホールを行ないながら、それらの性能解析や構造研究をして設計の勉強を行ないました。

また1950年代の後半から1960年代始めにかけて種々のエンジン要素の試験研究に取り掛りました。硝酸ケロシン燃料のロケットの燃焼試験や、ラムジェットエンジンの燃焼試験がその一例です。後者の高空性能試験は当時完成したばかりの航空宇宙技術研究所の低温低圧風洞で行ないました。又これらの試験のために高温ガス測

原稿受付 2000年1月24日

*1 元 川崎重工業(株)

〒075-0101 加古川市平岡町新在家 2214-40

定用の熱電対や、流れの計測用などの種々の装置を考案して使用しました。

次なるステップは当然エンジンの製造でありました。1967年にそれまでオーバホールを行っていた T53-11A エンジンの製造ライセンス契約を締結し生産を開始しました。いざ生産の準備にとりかかってみると、修理とはまったく別の次元の高度な加工が必要であり、それらの準備のための勉強と手配に奔走しました。なにしろ今日のように、やれ設計だ・加工だ・材料だなどと、それぞれ専門の組織と人員が揃っているわけではなく、技術と名のつく作業はほとんど自分でやっていきました。加工設備の調達についても、国内には無い物ばかりとあってよく、ライセンス工場を視察し海外メカを歴訪して一つ又一つと決定していきました。代表的な機種を挙げても、遠心コンプレッサ切削用の三次元の倣い加工機、タービンディスクのセレーション加工用ブローチ盤、燃焼器成型用のハイドロフォームプレス、燃焼器の真空蝕付けとタービンプレードのアルパックコーティング用の真空炉、セレーション研削盤があります。これらの装置にはいずれも高精度且つ難加工が要求されており、当時の日本の工作機械メカの能力を超えていました。しかし今日ではこれらの機械のほとんどで、日本のメカが世界のトップレベルに達しているのをみると今昔の感があります。

素材の調達についても問題が山積みでした。遠心コンプレッサ用アルミ鍛造材・チタン合金鍛造材、タービンディスク用ニッケル合金鍛造材、燃焼器用ニッケル合金板やコバルト合金板、タービンプレード精密鑄造材など、いずれも当時のわが国素材メカが手がけていなかったり、それまでの国内の常識を超えた高品質の要求規格に合致しない製品が多くありました。メカの製作意欲は非常に高く、目標達成のために我々もメカ側の技術者と散々苦労を共にしましたが、残念ながら最終的には輸入せざるを得なかった材料も多くありました。素材についても、今日ではそれらの多くは立派に国産されていますし、最先端の素材であるセラミックや複合繊維材料が世界のトップレベルに並んでいるのは、関係者の努力の賜物であります。

1972年に T53-11A エンジンに引き続き馬力向上型 T53-13B を、1984年には大型ヘリコプタ用 T55-712 エンジンのライセンス製造を始めました。又これと共に、オーバホールを行っていたエンジンの部品入手が次第に困難になってきたので、J33 やオリフェーズエンジンの部品製造を次々に実施しました。これらの作業で得られたノウハウの一つは、メカや国により設計思想・加工法・材料等にも大きな違いがあることと、製造したエンジン・部品の性能や品質の保証のために、厳しく且つ膨大な ST・QT といわれる試験が必要で、例えば米軍では MIL 規格、米民間航空では FAR 規格として要求されており、その遂行には多大の費用と期間を要するこ

とを習得したことでした。(ちなみに航空エンジンの開発においては、通常開発の立ち上がりからエンジンの運転開始までの費用は、全開発費の 30% 程度とされています。)

これらの仕事の遂行により得られたソフト・ハードの蓄積を基にして、次なるステップとしていよいよ待望のエンジン開発に乗り出しました。その第一歩は、手元にあるエンジンのアプリケーション開発と、それに必要なエンジンの改修と付属機器の開発、運用試験の実施によるデータの収集でした。1978年より1981年にかけて T53 エンジンを戦車のディーゼルエンジンと換装して実車走行試験を行ない有用性を実証することが出来ました。この時燃費の向上を図るため固定式の熱交換器を開発し装着しました。又国鉄とタイアップし川崎車両(株)(当時)の協力のもとに T53 の産業用型 F14 エンジンをディーゼル動車に搭載し、伯備線などで走行試験を行ない満足すべき性能評価を得る事が出来ました。〈「表紙によせて」参照〉また同エンジンの除雪機への応用を計画し雪中テストを行ないました。1964年から1974年にかけて TF14 の馬力向上型 TF25 エンジンは、三井造船の PP-15 型ホバークラフトに採用され、この船は沖縄の海洋博覧会で観客の輸送に活躍しました。また BO502 エンジンをトラックに搭載して走行試験を行ない、ガスタービン自動車へのアプローチを行ないました。ホバークラフト以外のプロジェクトはいずれも時期尚早或いは経済性或いは後方支援などに問題があり、技術的には良好な結果を得ながらも実用にはつながりませんでした。しかしながらガスタービンエンジンの産業分野への適用に際して運用条件・環境条件やユーザの要求などに関する貴重な経験が得られ、以後の産業用ガスタービンエンジン開発に大いに役立ちました。

一方ガスタービン発電機の将来性については以前より着目していたので、マーケット調査を進めるとともに、その開発計画に着手しました。まず1970年より、T53 エンジンを改修して耐久性を向上させ、このエンジン駆動の発電装置を試作し、各種の試験を実施して実用性を確かめました。この装置は鳴門海峡における OFF-SHORE RIG の電源装置として使用されました。これと平行して自社開発のガスタービンの試作に乗り出し、200馬力クラスの小型産業用エンジンのデモンストラータの試作に成功しました。このエンジンを使用してモータボートなど各種の分野での応用の可能性をテストし満足な結果を得ました。

これに力を得て、本格的なガスタービンエンジンの開発を推進し、1974年には300馬力クラスの S1 型エンジン、翌年には1600馬力クラスの M1 型エンジン1980年には1000馬力クラス S2 型エンジンをと次々に成功裏に開発を進め、これらを使用したガスタービン発電装置を携えて市場に進出しました。この結果日本に本格的なガスタービン発電機のマーケットが創生されたといえ

ます。この後も性能改善と新機種の開発を続け、現在 30 馬力クラスの小型から、7000 kW クラスの中型までの品揃えをして、わが国のこの分野におけるリーダーの位置を確保しています。

尚これらの産業用ガスタービン事業は、事業の拡大により、1990 年に航空機用エンジン部門より分離して産業用ガスタービン部門として独立しました。したがってそれ以後の産業用ガスタービンについては、機会をいただければ別途担当者より紹介させていただきたいと思います。

航空用エンジンの分野では、その膨大な開発費・マーケットへの売り込みの困難さ及び要求される技術レベルの高さ等が高いハードルとなっており、開発の意欲はあっても日本の一社単独での開発は非常に困難でした。そのため日本での航空エンジンの開発は、J3 エンジン開発以後中断していました。しかし航空エンジンにはマーケットの将来性・技術の先進性があることと、関係者の熱心な働きかけにより、航空エンジンの開発が再び国家プロジェクトとして取り上げられ、1971 年より通産省工業技術院の大型プロジェクトとして、FJR 710 ファンジェットエンジンの開発が始まりました。このエンジンはわが国で初めての民間エンジン開発計画であり、しかも世界の先端レベルを目指したものでした。航空宇宙技術研究所の指導を受けながら石川島播磨重工・三菱重工・川崎重工三社が協力して、目標の達成に努力しました。川崎重工は燃焼器を主体に担当し、製作や燃焼試験を行ないました。燃焼器は要素の中でも経験と実験に依存する割合が大きく、散々苦労を重ねましたが貴重なノウハウと信頼を得ることが出来ました。このプロジェクトで燃焼器を担当して得た評価により、以後の多くのプロジェクトにおいても燃焼器を担当するきっかけとなりました。その他、社内的にも種々の関連研究を実施しました。これによって、全体計画、性能設計、騒音・排気排ガスの低減、構造強度の解析等種々のソフトウエアの整備と材料加工に関するハードを充実することが出来ました。このプロジェクトの特筆すべき点の一つは、性能に関しては勿論、日本で始めて安全性・耐久性・環境適応性について徹底的な試験を行なったことです。150 時間の耐久試験、250 サイクルの低周波疲労試験を繰り返し、さらに鳥・雹・水吸込試験、横風、防水、排気排ガスの低減、騒音低減、高空性能等の試験を実施しました。そのため大型の低サイクル疲労試験装置、高速鳥・氷打込用発射装置、横風発生装置、防水試験装置等を次々設計・試作しました。これら装置の多くは国内で始めて製作されるものであり、予算不足と性能の確保に苦心しましたが、試験が無事完了できてほっとしたものでした。高空性能試験だけはエンジンを英国の国立ガスタービン研究所 (NGTE 現 RAE) に持ち込んでテストしました。

FJR は 2 期 11 年にかけて 9 台を試作し、4000 時間に及ぶ試験を行ないました。その後航空宇宙技術研究所で

開発された STOL (短距離離着陸) 実験機に搭載されて 1974 年より飛行試験を行ないました。このエンジンはほぼ初期の開発目標を達成して、貴重なノウハウを得られたと共に、日本のエンジンの実力を世界に認知させる原動力となり、その後の国際共同開発の基礎となりました。

1978 年初頭、ロールスロイス社 (以下 RR 社) より、日本の業界に、120-160 席の中型短距離民間旅客機用推力 20,000 ポンドクラスの新型ターボファンエンジンの共同開発計画が提案され、市場調査・技術基礎検討の後、1980 年初頭からスタートしました。既存エンジンより燃費を 20% 減らすことを目標としました。このために日本の 3 社より RR 社 BRISTOL 工場に技術者を派遣して、共同設計を実施しました。共同設計とはいっても RR 社の設計提案と一緒に検討し了承するスタイルで、実力から考えてもやむを得ませんでした。しかし彼等の設計思想、巨大な組織、高価な試験設備、莫大な経験・ノウハウを身をもって感じるものが出来たのは大きな成果でした。また共同作業中に RR 社の担当技術者がノウハウを教えたがらないのに対して、設計の神様 Sir S. FOKKER (この時は既に一線を退いていましたが) が「一緒に仕事をするなら隠さず教えてやれ」とフランクな態度を示してくれたのに大きな感銘を受けました。この時の人的な交流と相互の信頼感が後々の共同作業にも生かされてゆきました。特に川崎重工-RR 社間では船舶用エンジンの技術提携・RB 211・TRENT の開発参加と緊密な関係が続いています。仕事はそれとして私は、BRISTOL 市郊外の風致地区に仲間と家屋を借りて、日本食の自炊にテニスに、市央の公園でゴルフ、古城へのドライブなど英国生活を楽しむことが出来ました。

この RJ-500 エンジンの開発は順調に進行し試運転にこぎつきましたが、この時期世界の三大エンジンメーカーであるプラットアンドホイットニ社 (以下 P&W) 及びゼネラルエレクトリック社 (以下 GE) も同じクラスのエンジンの開発計画を進めていました。これらと競合するためには更に高性能化を図ることが必要であり、そのために費用も大幅に増大することが予想されました。このために 3 大エンジングループ間での熾烈な抱き込み競争が行なわれ、交渉のため各社ののトップとそれをサポートする我々技術屋や管理屋が欧米を飛び回ったものですが、最終的には劇的な幕切れで、RR-日本と P&W グループ対 GE-スネクマ (SNECMA 社) グループが 150 人乗りの民間旅客機を目指して競争を繰り広げることとなりました。これによって開発されたのが V 2500 エンジンで、1988 年に厳しい審査をパスして型式承認を取得して量産にはいり、現在では GE-SNECMA グループの CMF 56 エンジンとマーケットを二分しています。今年 3 月末で累計受注 2300 台、出荷 1300 台の予想となり、日本の民間エンジンプロジェクトの柱となっています。この開発に際しても、立ち上がり時期、

石川島播磨重工・三菱重工の技術者と一緒に、RR 社の DERBY 工場に出向いて作業を行ないましたが、技術面はさておき最もびっくりしたのは、どのようなエンジンを開発すべきかを決定するまでのプロセスでした。世界中のエアラインを歴訪し、欲しい機体と需要の見通しを調査し、機体メーカーへの売り込みと技術的な検討を重ね、出来上がった計画を持って、再度エアラインを訪問する。この繰り返しを何度となく続けることで、何時までたってもゴーがかからず、設計グループはいらいらしている。一方では RR や P&W は要素の基礎研究は社内ですでに進めていくといった状態でした。ところが一旦ゴーのサインが出ると、今度は相手グループとの時間の競争です。人が足らぬ、予算が無いなど、それまでの国内での開発のような泣き言は一切通用しません。負けたら注文はゼロで莫大な開発費も一切パーです。(この点は産業用とは若干異なるようです。) もう 1 点身にしみたのは、コストの厳しさです。なにしろ売り込みの相手はエアラインで多量の同一エンジンのユーザであり、しかもその数は限られています。ここに売り込むには、当初のエンジンの影も形もない時点で、コストと技術目標の保証を要求されます。長期間にわたっての安定した供給・後方支援が絶対条件です。我々が国内で今まで甘えていた、コスト積上げ方式の防衛需要などとは比較になりません。従来常識の 1/2, 1/4 にしなければ客が買ってくれないし、売れても大赤字です。散々泣かされたものですが、しかし今にして思えば、これを乗り越えていったからこそ、今日の事業が成り立っているのです。

他方この時期、国内では発電用大型高効率のガスタービンの開発が計画され、1978年に通産省工業技術院の委託研究としてムーンライト計画に、総合効率 55% 以上を目指した、AGTJ 100 A 100 MW 級リヒートガスタービンの開発が採用されました。高効率ガスタービン研究組合が設立され、プラントメーカー 6 社及び電力中央研究所の共同研究が始まりました。川崎重工もその一員として参加し、高圧燃焼器及び低圧燃焼器を担当し開発しました。我々にとってはこれまで手がけてきた航空用或いは中・小型のエンジンと異なり、全てが巨大で且つ重厚なのに面食らいました。この開発により大型プラントでの効率 1% の価値と長時間の連続運転のための耐久性の重要性が実感できました。目標の高効率を達成するため計画し、達成に苦勞した高圧・高温 56 気圧、1300℃ も、今日では普通のレベルであり、航空用の最先端クラスでは 1500℃ は実用段階で更には 1700℃ 以上を目指して開発が進められているのは今昔の感があります。

社内でもなんとか自前の航空用エンジンを開発したいと考え、航空機グループとタイアップして小型の無人機用推力 150 kg クラスのジェットエンジン KJ 12 の開発計画を 1979 年に開始しました。開発は順調に進み計画どおりのコンパクトなエンジンが完成しましたが、残念ながら採用になりませんでした。このエンジン開発での

思い出は高空性能試験のためにドイツのシュツットガルト大学にエンジンを持ち込んだことです。当時日本には高空試験装置は存在せず、J3 エンジンに米国に、FJR エンジンに英国に持ち込んで試験しました。欧米諸国は国家は勿論、一応のエンジンメーカーはいずれも立派な試験設備を有しており、その巨大さと当時の価格で 3000 億円とか 5000 億円といわれる金額に、うらやましくてため息をつくばかりでした。しかし今では日本でも小規模ながらも防衛庁が北海道にこの施設を建設して使用できるようになったのは嬉しいことです。1986 年には、社内の航空機グループが計画していた純国産の中型ヘリコプタ用に 900 馬力クラスの高圧ガスタービンの開発を行いました。このプロジェクトは機体は三菱重工・富士重工・川崎重工、エンジンは石川島播磨重工・三菱重工・川崎重工と、それぞれ 3 社が総力を挙げての熾烈な競争になり、川崎重工は機体のプライムを獲得できましたが、残念ながらエンジンは採用されず分担参加にとどまり、電子式燃料制御装置 (FADEC) などを担当することとなりました。

船舶用ガスタービン分野では、防衛庁の主力艦の主機としてガスタービンに対する関心が高まり、RR 社と協力して同社の航空エンジン転用型船舶用ガスタービンの採用を働きかけました。それまで使用されていた蒸気タービンと比較して、はるかに小型軽量であり、瞬時にスタートできるなど数々の利点がありました。しかし燃費が、特に巡航時に高いのが問題で、そのために高速用の大出力と巡航用の小出力の 2 機種を搭載する方式や、複数のエンジンを積む方式等が計画され、採用となりました。川崎重工は 1977 年に RR 社と技術提携を結び中型護衛艦の主機として高速用に 25,000 馬力のオリンパス TM 3 B, 巡航用に 5,400 馬力のタイン RM 1 C を国産化しました。更に 1983 年には最新鋭の 13,500 馬力スベイ SMIA と続けました。後に GE 社の LM 2500 が参入するまで護衛艦の主機を独占しました。

民間用としては先に述べた 3 隻のホバークラフト用の TF 25 は別として、ディーゼルエンジンと比較して価格・維持費が高い、高級燃料が必要でしかも燃費が悪いなどの理由で、軽量・小型・高性能・振動が少ないなどの長所を持つにも拘わらず、ガスタービンはなかなか普及していません。僅かな例外がジェットフォイルです。ボーイング社が開発し現在川崎重工の船舶部門で製造していますが、世界で 37 隻が運行されています。エンジンは T 56 ターボプロップエンジンの産業用・船舶用型 501 KF が搭載されていますが、このオーバーホールを 1989 年より行なってきました。これらの船舶用エンジンの製造やメンテナンスで感じたことは、航空用と船舶用との違いです。これらのエンジンはいずれも航空用として大量に生産・運用され信頼性・耐久性を実証されたエンジンですが、いざ艦船に搭載して運用してみると、思いがけない不具合が特に当初発生しました。海水雰囲気

気での運行、荒天時の海水吸い込み、船体動揺、低質燃料等などの問題と共に、運転や整備に携わる人たちがガスタービンに不慣れであったということ、逆に我々メーカ側も航空エンジンシステムにどっぷり漬っていたのが大いに影響していました。例えばオーバホール間隔が決められていて、エンジンを船体より取り下ろします。エンジンには完全な互換性が保証されていて別のエンジンと換装するのですが、このことが、説明してもなかなか了解が得られませんでした。今までは、エンジンの積み替えなどしたことがないというのです。しかし徐々にガスタービンの優秀性が理解され、主機のみならず、それまでディーゼルエンジンが使用されていた発電分野にも広く採用されるようになりました。

1980年代末から1990年代にかけては、従来のエンジンの改良発展や国際分業の拡大が図られると共に、宇宙往還機用推進システム、次世代機の研究・超音速輸送機システムの開発などのエンジンプロジェクトや、要素の高効率化・セラミックや複合材料の開発などの新規計画が国内でも或いは国際共同開発でも次々に打ち上げられその成果が大いに期待されています。しかしその実用化はいずれも簡単ではなく今後の更なる努力が必要と思われます。将来を担う技術者の奮起と経営者の決断をお願いしたい。

あとがき

NHKの紅白歌合戦が50回を迎えました。ガスタービンと共に46年というとはほぼ半世紀をガスタービンと暮らしてきたことになります。人もソフトもハードも、無い無いづくしの出発でしたが、おかげで設計・開発のみならず、技術全般手がける機会に恵まれたとも言えます。

46年間の、設計技術の進歩、サイクルの高温・高圧化、主要空力要素効率向上、高温部の冷却効率アップ、制御技術の進歩、新材料の開発、低公害化は目覚しいも

のがあります。また試験設備、工作設備などのハードも、人員組織など全てが格段に整備されました。用途開発も進み、業界規模も50年前とは比較にならないほど拡大しています。しかしこの間における技術の進歩は、他の先端産業、電子・半導体・通信・コンピュータ・ロボット・バイオ・原子力・マイクロマシンなど次々と夢を実現していったのと比べると、技術的な革新性に乏しいとも言えます。

最近読んだ雑誌「てんとう虫」に、現代SFの父とされるヒューゴ・ガーンズバックが1911年に表した本の中に登場する数々の夢の利器、蛍光灯・レーダ・プラスチック・テープレコーダ等々が、今では日常的に使用されているのと比較してもその感を強くします。

私は1965年頃、朝日新聞の未来の夢という特集で超音速旅客機・エネルギーの無線伝送・反重力装置を挙げましたし、1984年の「機械の研究」で将来の技術動向として、プロップファン・水素エンジン・レーザ航空機・可変サイクルエンジンなどを挙げましたが、これらの実現にはまだまだ時間がかかりそうです。

技術者全員が、効率や公害低減に苦勞しており、今後も努力は続くでしょう。勿論それも大切ですが、法律の改変や燃料代の変動に振り回されたり、ニッケル禁輸や価格高騰にあくせくするばかりでなく、たまには燃料電池や太陽エネルギーなどの新燃料や、夢の技術に目を向けることも頭の体操になって、良いかもしれません。

私自身、長らく産業界に身を置いて、技術屋といえども利益の追求に、そのための競争にあくせくしてきました。しかし退職して多少客観的にものを見られる立場になり、最近では技術も最終的には社会のためにそれが役立つかどうか最も大切であり、そのためには何が作れるかではなく、何が要求されているかを知ることが基本となる、さらには科学技術の進歩が人間の幸福に結びつかなければならないと強く感じています。

オレは技術者だと、誇り高く語れる日を目指して

大橋 秀雄^{*1}

OHASHI Hideo

1. 私的なまえがき

1952年、大学3年生のときに生まれて初めて学会なるものに入会した。毎月配られてくる日本機械学会誌を眩しいようなまなざしで手にしてから、もう48年が過ぎ去った。次に入ったのは日本航空宇宙学会で、1965年NASAに研究に赴くのに先立って、Aerospaceに色づけるため急遽入会した。いまでも続いているが、これは会誌積ん読会員に終始している。三つめの学会、日本ガスタービン学会に入会したのは1972年だから、創立以来の会員である。ガスタービンは、私を技術者の道に駆り立てた張本人だから、学会にも応分のお手伝いをしたつもりである。その後いろいろな学会が誕生するたびに、断り不全症候群の私は次々に入会し、現在は国内国際合わせると十指に余る学協会を「会費を納める」という形で応援している。

ガスタービン学会に入会したのと同じ年に、日本工業教育協会（現在は日本工学教育協会）にも入会している。格別教育に熱心だったわけでもないが、周りの先生達で会員になっているひとが余りにも少なく、組織の犠牲になったつもりで入会した。それともひょっとすると、私は潜在的に教育に熱心だったのかも知れない、ふふふ。

1992年、34年間務めた東大を定年で辞して、現在の工学院大学に移った。移るに当たって考えた。研究室を軌道に乗せて、価値のある研究成果を継続的に産み出す態勢を築くには、少なくとも十年はかかる。私に与えられた時間は余りにも短い。それなら思い切って、研究の最前線でしのぎを削る現役研究者達がしり込みする仕事を引き受けて、彼らの後方支援をしよう。それは、教育や研究の環境を改善する仕事であり、また我々が育てる技術者が、それぞれに生き生きと活躍できる社会を実現することである。

私のそのような思いは、東西冷戦の終結、バブル経済の破綻に続く社会の大きな変動の中で、新しい時代のパラダイムを求める動きとうまくマッチして予想以上の進展を見せた。現在私は、日本学術会議の工学関係の部長を務めるかわら、102の工学系学協会の集合体である日本工学会の会長を引き受けている。いささか大げさな表現をすれば、延べ60万人の傘下学協会の会員を代表するだけではなく、日本の240万技術者を代弁する責任

がある、と思っている。以下の小文は、そのような活動報告の一つとしてお読みいただきたい。

2. 学尊業卑とプロフェッショナル軽視の伝統

長い文化の伝統を誇る我が国では、それぞれの時代を通じて学問を尊ぶ気風が生き続けてきた。それは支配層から庶民層まで階層を超えた共通の気風であり、二宮尊徳の例が示すように、貧しさの中にあっても学問を希求する心構えが最大の美德として称揚された。最高「学」府で学ぶ機会を得なかった親たちが、子供に「学」を与えようと、どんなに大きな犠牲を払っていることか。

これに比べると、「なりわい」に関わる「業」は、医者とか右筆とかの特殊な例を除けば卑賤なものとされた。これは士農工商という身分制度の下層部分と業が重なり合い、業を修得することは、世過ぎ口過ぎの便法に過ぎないという意識が染み付いてきたからであろう。では、学は何ゆえに尊いのか、改めて考える必要がある。

孤立した個人が備える学は、単なる個人の持ち物に過ぎない。その学が社会的な意味を持つためには、その学を他者に伝えて社会全体の知とするか、あるいは自らの業の中にその学を活かして業を高めるかの何れかの途しかない。前者は限られた人（教育者・研究者）にのみ許される途であり、大多数のものにとって学を活かす途は後者にある。

学と業はこのように一体である。学業とは単に「学び習うこと」（広辞苑）を超えて、「学びそれを業に活かすこと」でなければならない。むしろ教育勅語にある「学ヲ修メ業ヲ習ヒ以テ知能ヲ啓発シ…」という一節が、学業の本来の意味を示している。学校の始まりを入学式と呼び、終わりを卒業式と呼ぶ。卒学式とは呼ばない意味を改めて考える必要がある。

学を尊ぶあまり業を軽視する我が国では、プロフェッショナル（知的専門職業人）を認知・尊敬する気風が薄い。わずかに医者や弁護士は社会的に尊敬されているが、これは希少な例外である。社会の機能が日々つつがなく果たされていることを陰で支えている多数のプロは、軽視、いや無視され続けてきた。

それでも、これまでの日本はそれなりに安全で信頼のおける社会を築いてきた。それは個人が企業（官民を含む）という組織の中で終身雇用の殻に守られてすっぱり収まり、企業がそれぞれに社会に対する責任を果たしてきたからであろう（組織基盤型社会）。いまやその構図

原稿受付 2000年1月11日

*1 工学院大学

〒163-8677 新宿区西新宿 1-24-2

は崩壊しつつある。多くの民間企業は、グローバルな生き残り競争の中で、社会的責任に対する意識が希薄になりつつある。また雇用の殻は一層不確かなものと変わって、個人はもはや企業の中で安住することが許されなくなった。我々は、企業人（組織人）である前に、先ず個人として自立することが求められるようになった。

様々な職種のプロががっちりとしたネットワークを組み、それが社会全体を覆い尽くして日々の安定と信頼を担って行く。そのプロたちが、世界標準を満たす能力に裏付けられていれば、我々は21世紀の潮流であるグローバル化にも容易に対応してゆくことができる（個人基盤型社会）。そのような社会を実現するための第一歩が、プロフェッショナル軽視の風潮を乗り越えることにあると思われる。図1は、上述の社会基盤の変化を示すイメージ図である。

組織基盤型社会では、赤い袋（企業）の中には赤い玉（従業員）が詰まっており、従業員は企業の殻を超えて直接社会と向かい合う意識が不要であった。隣の青い袋には青い玉が詰まっており、赤い玉を青い袋に入れたら、青く染まるまでほとんど新人としてやり直す必要があった。

これからの個人基盤型社会では、例えば医者という専門職は、社会全体に張り巡らせたネットワークを通じて国民の健康と生命を守ってゆく。難度の高い医療には、勿論大病院という組織が不可欠である。しかし組織の中には、自立した個人がある。同様に技術者も、ネットワークを組んで技術を基盤とした近代社会を支え、国民の安全を守ってゆかねばならない。多様な職種の専門職が、専門性と倫理感に裏付けられてそれぞれの責任を果たしてゆけば、安定して信頼できる社会が築かれるはずである。我々は、いままさに、社会の形態が移り変わる途中の苦しい段階にある。

3. 学位と職位

学位（academic degree）とは、高等教育修了に対応して大学等の学位授与機関が認定と登録を行い、学歴の

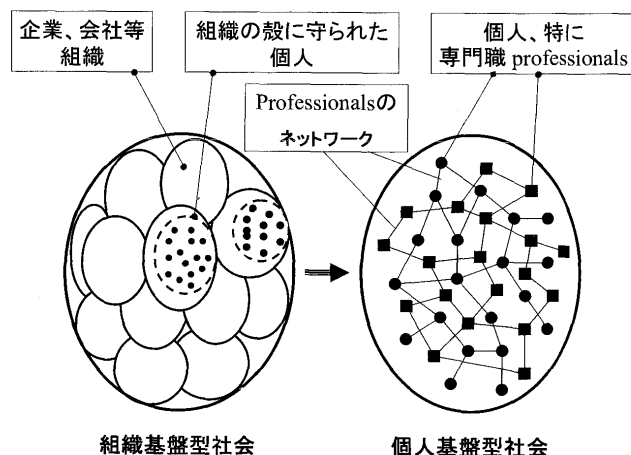


図1 組織から個人へ 社会基盤の変革

指標として用いる称号である。我が国では、大学学部卒で学士、大学院修士課程修了で修士、博士課程修了またはそれと同等で博士の学位が授与される（高等専門学校および短期大学卒は準学士と称することができる）。登録の事実と反する学位の詐称は、特別な被害が出ない限りは単なる嘘つきとして終わってしまうが、例えば公職選挙のような公的な場における学位詐称は、公職選挙法によって処罰の対象となる。我が国の学制は、戦後アメリカに倣って6334の新制度に改められた。従って、制度的にはアングロサクソン系のそれと整合性があり、我が国の学士、修士、博士はそのまま Bachelor, Master, Doctor と対応している。

一方、医師、技術士、建築士などで代表される専門職業資格は、職位（professional degree/qualification）に属する。高度の専門的知識や技能を要する職業に就く能力を有することを、国またはそれを代行する機関が認定して資格を授与する。資格には、その性格に応じて免許（license）と登録（register）がある。ある専門職業に従事するためには絶対必要な資格が免許であり、医師や建築士がこれに該当する。一方我が国の技術士は、240万人といわれている技術者のうち4万人弱しか保有していないとされてきた。技術者資格であるが、独占的専管業務を持たないため能力証明の登録に止まっている。学位と職位の扱いについては、表1のように国際対比できる。

職位は個人の属性である。戦後の我が国産業の歴史的な大発展は、むしろ組織基盤型社会における集団主義の功績であったことは自明である。その中で技術士などの個人資格を求めるものは、集団の中の異端児として冷視される風潮すらあった。これが、イギリスの技術者がCEngを持つ比率に比べ、日本の技術者が技術士を持つ比率が十分の一にも及ばないという結果を招いた。

また大学など高等教育機関の教育者には、専門職育成の意識が欠如してきたため、学位と職位の連携を考えることは全くなかった。

いま、潮流は集団主義から個人の力にと大きく変わろうとしている。そのような時代の流れを読みながら、我が国における学位と職位の関わりをどのように設計すべ

表1 工学系における学位と職位の国際対比

	アングロサクソン諸国	ヨーロッパ大陸諸国	日本
学位 Academic degree	BS, MS, PhD	ドイツの例: Dipl.-Ing., Dr.-Ing.	学士、修士、博士
職位 Professional qualification	PE (USA) CEng (UK) CPEng (Aust.) PEng (Canada)		技術士、建築士など
特色	学位と職位の分離 学位は職位の前提	学位と職位の一体化	学位は職位を前提とせず 両者は無関係

きか。これは、我々に課せられた大きな課題と言わざるを得ない。

4. 現代社会と技術

現代を特徴付ける最大のものは環境の人工化である。都市においては、建造物、道路、交通機関、通信網などが空間を埋めつくし、その中での人々の生活も、人工物の道具に支えられてのみ成立する。このような状況は、近代に始まる技術の進歩を根拠として出現したものであるが、技術の進歩の中心に技術者がいる。技術者は単に技術進歩の推進者であるのみならず、その成果が人類・社会に及ぼす影響についても強い責任を持つ自律的な行動者でなければならない。

技術者がこのように変化を遂げるとき、技術者の新しい社会的定義が不可欠となる。このことが、技術者が社会的に認知された専門職資格を必要とすることの本質的根拠である。

一方、資格制度の確立とともに、このような能力を持つ技術者の教育も、技術の学理を教授する工学教育を高度化するに留まらず、社会的職能集団としての自覚をもつ専門職を育成する技術者教育の視点を強化する必要がある。このような教育の質的変化と改善を押し進めるために、水準の高い教育を実施していることを専門教育プログラムごとに認定する制度の導入が求められるようになってきた。(以上は、1998年12月17日付けの「技術者教育の認定制度及び技術者資格問題に関する日本学術会議会長(吉川弘之)談話」に基づいたものである。原文はホームページ <http://www.scj.go.jp/data17.html> を参照のこと。)

健康を維持し、生命を全うするために、我々は健康のプロ(health professionals)－医師－に全面的に頼っている。人生の終末－死－を看取るのもまた医師である。しかし、健康で元気に活動する人生の大部分を、我々は人工物に囲まれた現代社会で生活を営み、好むと好まざるに関わらず、我々の生命や安全を人工物の信頼性に賭けている。飛行機に乗れば、設計突風強度の限界内では壊れないはずの機体に命を預け、高層ビルに入れば、設計地震荷重の範囲内では壊れないはずの躯体構造に命を任せる。現代人は、利便と引き替えに、自分の命を技術者が設定する人工物の信頼性に預けているのである。絶対に安全な技術はない。それだけに技術者の責任は重大である。

健康のプロが医師であるように、人工物のプロは技術者である。医師は患者と正対し、その緊迫した関係を直接受け止めることができる。しかし技術者は、人工物のユーザーと直接向かい合うことはない。技術は、巨大な工場、複雑な販売網、入り組んだサービス業など多くの組織の介在によって成立する。しかし技術者は、組織の壁を超えてユーザー－社会－を感知し、それに責任を果たさなければならない。技術者が医者並の社会的認知を

得たいとするならば、資格制度や教育をそれに対応できるように整備しなければならない。

1990年代初頭の冷戦体制の崩壊を契機として、経済活動に先導されてグローバリゼーションの奔流が始まった。加えて1995年からスタートしたWTO(世界貿易機関)体制のもと、モノに続いてサービスの貿易自由化が急激に進み始めた。サービスの基本は人であることから、技術者の交流を円滑に進めるための技術者資格の相互承認や、資格の前提条件である技術者教育の国際同等性を担保することが求められるようになった。これもまた、わが国の技術者の在り方を根本的に見直す動機となった。

5. 工学教育と Engineering Education

我々は長らく、Engineeringを工学と訳して両者は同等なものと思いこんできた。したがってEngineering Educationを工学教育、Faculty of Engineeringを工学部と訳して、その意味するところも同じと思ってきた。我々はまず、その誤解を乗り越える必要がある。

工学とは何か? 工学の定義として現在最も一般的な理解は、8大学工学部を中心とした「工学における教育プログラムに関する検討委員会」が提示している次のものであろう。

「工学とは数学と自然科学を基礎とし、ときには人文社会科学の知見を用いて、公共の安全、健康、福祉のために有用な事物や快適な環境を構築することを目的とする学問である」

一方Engineeringは英語であるから、英語圏の英米の定義が基準になる。アメリカにおけるEngineering Educationの認定団体であるABET(Accreditation Board for Engineering and Technology)が与えている定義を、現代に適合するよう一部修正したものが次の表現である。

「Engineeringとは、数理科学、自然科学および人工科学の知識を駆使し、社会や環境に対する影響を予見しながら資源と自然力を経済的に活用し、人類の利益と安全に貢献するハード・ソフトの人工物やシステムを研究・開発・製造・運用・維持する専門職業」

工学は学問であり、EngineeringはProfessionすなわち専門職業である。工学教育は工学(強いて訳すればEngineering Science)という学問を教える教育であるが、Engineering EducationはEngineering(強いて訳すれば技術業)という専門職業に関わる教育全般を指している。従って、職業の知的基盤を形作る学理(数理科学、自然科学から設計学のような人工科学までを含む)を学習するに留まらず、技術者として必要な判断力と実行力を強化する教育、すなわち教養教育(社会、経済、経営を含む)、倫理教育、総合力を養う設計教育、コミュニケーション力と自主的学習能力の強化、実地経験などを含まなければならない。

工学教育とEngineering Educationにこれだけ大きな

乖離がありながら、なぜ今までその違いを放置してこられたのか。それは、我が国に独特なものとして、教育に関してアカデミアと産業界の暗黙の役割シェアリングがあったからである。大学は知識だけを詰め込んだ素材を供給し、産業界がそれを一人前の技術者に、それもわが社に適した技術者に育てるという図式のもとでは、むしろ工学教育の方が望まれてきたのである。

工学教育の改革を訴えるとき、かならず過去の成功談が持ち出される。戦後の驚異的な産業発展を人材供給サイドから支えた工学教育関係者の自負は、私もその一員であっただけによく理解できる。しかし時代が変わったのである。これから求められる人材は、専門の基礎知識を確実に身に付けているという基本の上に、社会・経済にわたる広い視野、自主性と独創性、問題解決力などが求められる。教育もそれらの要求に実質的に応えられるよう、単なる知識の詰め込みでなく、自立して力を発揮できる個としてのプロフェッショナルの育成に重点を切り替える必要がある。この転換こそが、我々の教育を世界標準に近づける第一関門である。

Engineeringという専門職業に携わるひとがEngineer（技術者）である。Engineering EducationとはEngineerを育成するための教育であることを考えると、これを工学教育と呼ぶより技術者教育と呼ぶ方がより内容を直裁的に表現している。世界標準に適合するために求められる教育の改革は、簡単にいえば工学教育から技術者教育への転換である。

6. 評価と認定、機関認定と専門認定

我が国の高等教育機関は、大学設置・学校法人審議会の審査を経て設立が認可される。校地・建物面積、教育設備、教員の数と質が基準に適合しているか細かくチェックされているから、少なくとも初期品質については十分な保証がある。開学後は、文部省の視学委員による監査、自己点検・自己評価による自主的改善、大学基準協会の加入審査・相互評価などを通じて教育の質を高める仕組みが存在している。しかしこれらの日本的仕組みは品質向上運動としては理解されても、定期的な評価によって一定の品質に満たないものを排除するという欧米的な品質保証の感覚からみると、説得力のある認定システムとは言い難いところがある。

高等教育に関する品質保証は、大きく分けて機関認定 (institutional accreditation) と専門認定 (professional accreditation) に分類される。前者は、教育機関ごとに、それが提供する教育の質と、その質を維持・向上する組織的メカニズムを評価の対象とし、基準に満たないものを排除する。従って、上述の我が国の品質保証システムは、それらを総合して教育機関認定を目指しているものと理解できるが、設置後継続的に最低水準を保証する機能が欠如しているから、国際的な説得力に欠ける憾みがある。一方、専門教育プログラムごとに、成果 (outcomes)

に焦点を当てつつ要求基準を満たしていることを保証する専門認定については、我が国では皆無といって良い。

アングロサクソン系の国々を中心に、技術者教育の専門認定システムが完備されている。アメリカの ABET (<http://www.abet.org>) やイギリスの Engineering Council (<http://www.engc.org.uk>) などは、国を代表する唯一の組織として技術者教育の専門認定を行っている。我が国でも、透明性があり説得力のある技術者教育の認定システムが必要である。これを怠ると、品質保証もなくノーブランドの状況におかれた工学（技術）系の学生が、国際的な取り決めの中で不利益を被る局面がこれから多発する。加えて留学生に対する教育上の魅力も激減するであろう。

7. 日本技術者教育認定機構の設立

上述の事態を改善するため、1997年7月に日本工学教育協会と日本工学会が共同し、大学・学協会・文部省・科学技術庁・通産省・経団連などの代表が参加するなかで「国際的に通用するエンジニア教育検討委員会」(委員長：吉川弘之) を発足させた。これは、端的に言えば日本版 ABET をどの様に立ち上げるかを検討する組織である。その後準備が進み、99年2月始め工学系の学部、大学および学協会あてに技術者教育認定制度案が配布され、検討の依頼が行われた。またそれを担当する日本技術者教育認定機構 (Japan Accreditation Board for Engineering Education, JABEE, <http://www.kanazawa-it.ac.jp/JABEE/>) についても、設置を念頭に設立趣旨の説明が行われた。案に対して寄せられた意見を参考にしつつ制度と認定機構の修正を行い、99年9月1日に第1回設立発起人会を開き、99年11月19日に JABEE が設立された。設立後2年間は認定の試行を行い、経験を反映させながら本格認定作業に向けて制度の改善を行う。また審査に当たる評価者の訓練も合わせ行う。

なお、設立後2年を目途に本格認定に移行し、同時に社団法人格の取得とワシントンアコードへの加盟を目指している。

●設立の趣旨

技術者育成に関わる理工農学系高等教育が「学理 (Engineering Science) を教授するとともに、専門職としての技術者を育成する」ことを明確に意識し、教育の質を継続的に高い水準で実現できる仕組みを整備する。その手段として、我が国独自の技術者教育プログラムを設定し、その認定を行う組織として日本技術者教育認定機構を設立する。この機構は、学協会と密接な協力をはかりつつその目的を達成するとともに、我が国を代表する技術者教育認定団体として、技術者教育の国際同等性を相互に認めあう協定 (ワシントン・アコード) に加盟することを目指す。

●審査・認定の主役

技術者教育の基準を設定したり評価を行ったりする認

定作業には、分野別の教育・研究者と技術者の集団である各学協会が主体的な役割を果たさなければならない。大学は認定については「される側」であり、主役ではない。多くの学協会は、英文名に Engineers 或いは Engineering の語を含んでいる。そのような学協会は英文名の精神に立ち返り、後継者養成である技術者教育認定の作業に深く関与すると共に、大多数を占める会員技術者の専門家としての能力を生涯教育 (Continuing Professional Development, CPD) を通じて守り通すことによって、会員と共存共栄をはかる境地に一日も早く到達しなければならない。

なお、専門分野をどのように分割するかは、残された最大の問題である。単独の学協会が個別の分野を担当するケース、関連ある学協会が集合体を作って協力しあうケースなど、今後の検討に待つところが大きい。

●認定の目的

1. 質的保証 社会に対し、技術者教育の質がその要求水準および国際的水準に達していることを保証する。
2. 技術者教育の国際的相互認定などへの対応 国際的相互承認問題等が生じた場合には本制度で対応する。
3. 認定プロセスを通じた技術者教育の継続的改善 単に最低水準に達していることを保証するだけでなく、教育の質がより向上することに役立てる。

●基本方針

1. 4年制理工学系学部および2年の専攻科を持つ工業系高等専門学校と短期大学の技術者教育プログラムを認定する。数学、物理、化学、生物などの理学や農学に属する学科、コースであっても、要求基準を満たす教育プログラムは認定の対象となる。
2. 大学の独自性・多様性・革新の障害となってはならない。
3. 強制ではなく、当該学科・専攻・コース等の希望により実施する。
4. 認定基準やプロセスを公表する (透明性の確保)。
5. 権威ある中立的第三者評価とする。
6. 認定されたプログラム (学科・コース等) を公表する。
7. 認定の有効期限を当面5年とする。
8. 公正な一貫性のある評価とする。
9. 合理化して、無用の仕事を作らず、なるべく費用を掛けない。
10. 本システム自体も周期的に評価して見直す。

●審査方法

1. 認定は自己点検結果をもとにして実地審査により行う。
2. 審査内容 各大学で独自に立てた具体的教育目標に基づいて、教育手段 (入学者選抜方法、カリキュラム、教育組織) および教育環境 (施設・設備、財源、学費・住居などの支援体制) の目標に対する達成度や教育改善方法 (自己点検システム、継続的改善シ

ステム) を評価する。ただし、大学基準協会等との認定と重複するものは不要とする。教育目標の達成度の評価は各大学でその方法を考え、証拠を示してもらう (例: 試験問題と合否回答例、設計成果、レポート、ビデオなどの提示)。なお、大学、学科、時代により各プログラムで具体的目標は異なるはずであり、その目標に相応しい入学者選抜方法、教育方法、目標達成度などの評価方法を各プログラムで工夫してもらうことにより、大学の独自性を出すことが期待される。

3. 審査委員は、関係学協会等から推薦された人の内から委嘱する。なるべく多くの評価専門家を育てることも考慮して、各大学のプログラムにつき少なくとも1人の経験者を育てることを目標とする。企業関係者も数百人規模で育てる。

●審査基準

技術者教育の認定を受けるには、その教育プログラムが、分野を問わず適用される共通基準と、専門分野ごとに設定される分野別基準を満たす必要がある。共通基準は、現在の試案では以下の項目を満たすことを求めている。

- (a) 人類の幸福・福祉とは何かについて考える能力と素養 (教養教育を含む)
- (b) 工学的解決法の社会および自然に及ぼす効果、価値に関する理解力や責任など、技術者として社会に対する責任を自覚する能力 (技術者倫理)
- (c) 日本語による理論的な記述力、口頭発表力、討議などのコミュニケーション能力、および国際的に通用するコミュニケーション基礎能力
- (d) 数学、自然科学、情報技術 (IT) および工学 (engineering science) に関する基礎知識とそれを応用できる能力
- (e) 変化に対応して継続的、自律的に学習できる生涯自己学習能力
- (f) 種々の科学・技術・情報を利用して社会のニーズを解決するデザイン能力
- (g) 与えられた条件下で計画的に仕事を進め、まとめる能力

●成果、印刷物

1. 認定結果 (大学・学部・学科あるいは専攻、コース名、と認定の有効期間、和英両方で印刷公表)
2. 当該学科への認定コメント (改善点など、非公開)。特に教育を通じて実現された学生能力増加 (付加価値) にたいする評価点を知らせる。良い評価を得た大学ではこれを積極的に利用することが期待される。
3. 自己点検評価フォーマット (和英で公表)
4. 審査基準と方法 (和英で公表)

8. 国際的品質保証とワシントンアコード加盟

技術者教育の国別の認定システムとは別に、技術者教育の質的同等性を国境を越えて相互に承認し合う協定、いわゆるワシントンアコードが1989年に締結された。最初はアメリカ、イギリス、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、アイルランドの六カ国を代表する技術者教育認定団体が調印したが、現在は香港と南アフリカが加わっている。現在、ワシントンアコード加盟団体により認定された大学の教育プログラム(大学と学科名)が、冊子となって世界中に流布している。その中に、我が国の大学に関わるものは皆無である。

現在、ワシントンアコード加盟国はアングロサクソン系あるいは英語圏の諸国に限られている。ヨーロッパ連合を代表する FEANI (European Federation of National Engineering Associations, <http://www.cri.ensmp.fr/feani/>) や日本は、これまでオブザーバーとして接触を保ちながら動向をフォローしてきた。間もなく JABEE が立ち上がれば、認定が軌道に乗り始める機会を捉えて、当然ワシントンアコード正式加盟を申請する。なお、ワシントンアコード加盟団体は、何れも国家から独立した民間の認定団体である。

間もなく導入が始まる APEC Engineer は、基礎教育として必ずしも認定を要求していない。しかしワシントンアコード加盟国を中心に実現が図られている International Engineer は、基礎教育について同等性のある認定を要求している。これからますます重要になるグローバルな技術者資格に我が国の教育を対応させるためには、ワシントンアコードに加盟することが最も確実な手段であろう。

9. 技術者の生涯キャリアー

ー全体システムの最適化を目指してー

プロが重視され、社会の要所を責任をもって支える国。そのようなプロの一つとして技術者がある。技術者が、教育から始まって経験を重ね、適切な時期に国際的に認知される我が国の技術者資格を取得し、更に経験を重ねながら、必要に応じて、PE や CEng のような欧米諸国の資格や、APEC Engineer や International Engineer などの国際技術者資格の取得を目指す。また自ら

の知識・能力の陳腐化を防ぐため、継続専門教育(CPD)を制度化すると同時に、仕事を続けながら CPD を受けられるシステムを完備する。これは、生涯にわたって生き甲斐のある仕事を果たせる個人にとっても、また技術者の能力を最大限に引き出して産業競争力を高めようとする国の政策としても、共に望ましい目標である。

プロが重視され、生涯にわたって能力を発揮できる社会とするためには、全体システムが優れていなければならない。これまでは、教育は文部省、技術者資格(技術士)は科学技術庁、建築士資格は建設省、生涯教育は文部省と労働省、技術者の能力アップによる国際競争力の強化は通産省といった具合に、省庁個別の努力はあったが、システム全体を統一的に設計する視点が欠如してきた。これは日本のあらゆる分野で共通の現象である。

国際的に整合性のある新しい技術者資格制度が、現在技術士審議会ではほぼ審議が終わり、その報告書案が昨年末からウェブ上で公開され国民の意見を求めた。私はこの審議に加わりながら、技術者個人にとっても、社会にとっても、最も好ましいシステムに作りこみ努力してきた。

新しい技術者資格制度の基本は、技術士をプロとしての技術者の標準資格と位置付け、その数を現在の技術士(約4万人)の10倍以上に拡大することである。また資格取得の標準年齢を30才前後とする。試験は、4年制大学の卒業生を対象とする1次試験と、1次試験合格後少なくとも4年間の実務経験を経た後に受験できる2次試験に分けられる。なお、JABEEが目指している認定された技術者教育を修了したものには、1次試験免除の道が開かれる。資格取得後、日本技術士会や専門学協会が行う継続専門教育を受け、その記録を個人ごとに集計して開示できるようなシステムを整える。また、技術士資格の活用を図るため、官民挙げて制度を整える。将来は、二国間協定によって、PE や CEng などとの相互承認を図るとともに、APEC Engineer や International Engineer と容易に接続できるよう配慮する。これらを盛り込んだ新しい技術士法が今年度中に成立を目指している。表題に謳ったように「オレは技術者だと、誇り高く語れる日」が一日も早く実現するためには、成すべきことはまだまだ多い。

以上

微細組織制御された構造用セラミックスの開発と評価

宮島 達也*¹平尾 喜代司*²

キーワード：セラミックス，微細組織，破壊強度，破壊靱性，窒化ケイ素

Ceramics, Microstructure, Fracture strength, Fracture toughness, Silicon nitride

1. はじめに

セラミックスが示す優れた耐熱性は、原子間結合力の強さに本質があるが、破壊現象という観点からは亀裂先端での転位が抑制されるために破壊靱性が本質的に低い原因ともなっている。セラミックスが抱えるこの脆さの問題を克服する試みの多くは、耐熱性が低下する危険のある原子間結合力のコントロールによるのではなく、ミクロレベルの組織制御によって行われてきた。名古屋工業技術研究所では、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度の下、セラミックスの微細組織をコントロールすることにより複数の機能の共生を目指したセラミックス「シナジーセラミックス」の研究開発を実施している。本稿では、このプロジェクトにおいて開発された種々の優れたセラミックスのうち、高靱化設計に基づき微細組織制御された構造用セラミックスを紹介する。

2. 微細組織制御と共生効果

セラミック多結晶体において、微細組織を構成する粒子や気孔を微細化することにより、破壊源寸法が抑制でき、高強度化が図られることは良く知られている。しかしながら、亀裂の進み難さの特性を表す破壊靱性が低い場合には、一見安全と思われる微細な欠陥であっても応力集中によって急激に亀裂化し、破壊に至る脆性挙動を示してしまう。そこで、セラミックスの高靱化を目指す多くの研究が行われてきたが、その結果として粒子架橋現象の利用が効果的であることが分かってきた。架橋現象は、結晶粒と粒界もしくは粒界相との間に適当な破壊エネルギー差が存在すると亀裂は粒内ではなく粒界を伝播し、その結果、粒子が新たに出来た2つの破面間で架橋、噛み込み、引き抜き等に代表されるエネルギー散逸に関与する微視破壊過程である。このエネルギー散逸が大きければ亀裂の進展は抑制され、破壊に対して高い抵抗を持つ材料となる。架橋を形作る粒子として、従来、高い架橋応力に耐え得る太い棒状粒子やウィスカーが有効であるとされてきた。ところが、このような粗大粒子

をセラミックスの微細組織中に導入することは、その周囲に大きな欠陥を潜在させることとなり、結果として破壊強度を低下させてしまう。このような一般的概念から、粒子架橋現象を利用して高靱化を図った場合、セラミックスの破壊強度と破壊靱性の関係は二律排反にあり、両特性を同時に向上させることは難しいとされていた。

名工研の研究グループは、 β 相の柱状粒子を持つ窒化ケイ素セラミックスを対象に、架橋に寄与する柱状粒子を微細化することで強度低下を回避しつつ、その密度を高めて亀裂架橋を活性化させ、破壊靱性の増大を図ることを目指した^{(1)~(4)}。窒化ケイ素中に棒状粒子を成長させるには焼結時に核を必要とするが、通常の製造プロセスでは原料中に存在する β 相粒子がその役割を担っている。自然に存在する β 相粒子を核とした場合、発生する柱状粒子の大きさや向きは無規則（ランダム）である。しかし、人為的にコントロールされた種結晶を核とすれば、最終の目的であるセラミック多結晶体の微細組織も制御できる。研究グループがここで試みた制御パラメータは、核となる種結晶の粒子径、その分布、そして粒子配向性である。種結晶の粒子径およびその分布を限定することにより、最終焼結体に含まれる棒状粒子のサイズの制御が可能となる。また、種結晶に配向を与えることでエネルギー散逸機構に寄与する粒子密度を高めることができる。

種結晶の合成は、 α 型窒化ケイ素原料にイットリアとシリカを加え、窒素加圧下で熱処理して相転移と粒成長を起こすことにより行った。イットリアとシリカの混合割合を変えることで窒化ケイ素単結晶のアスペクト比の制御が広い範囲で可能であり、これを分級し核の寸法を制御した。さらに、添加した種結晶を配向させるために、種結晶を原料に添加後、成形過程で外部応力場として剪断力を作用させた。すなわち、種結晶を含む α 型窒化ケイ素原料に焼結助剤等を加えたスラリーを、押し出し法によりロッド状に成形し、成形方向に種結晶を配向させた。この製造方法では、設定条件を変えることにより特性値に幅を持たせることが可能である。その一例としては、1400 MPaの高破壊強度と11 MPa $\sqrt{\text{m}}$ の高破壊靱性の優れた特性を併せ持つ窒化ケイ素セラミックスが得られている⁽³⁾⁽⁴⁾。図1は、焼結体表面を鏡面研磨した

原稿受付 2000年2月1日

*1 工業技術院 名古屋工業技術研究所 構造プロセス部
〒462-8510 名古屋市中区平手町1-1

*2 工業技術院 名古屋工業技術研究所 セラミック基礎部

後にプラズマエッチングした微細組織の電子顕微鏡像である。図1(A)は、従来型の高靱化窒化ケイ素(強度 640 MPa, 破壊靱性 $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)であり、原料中に存在する無制御の β 相結晶を核とするために出来上がる棒状結晶は幅広い粒径分布を持ち、さらに、その配向はランダムであることが特徴である。一方、図1(B)は種結晶添加法と押し出し成形法による窒化ケイ素である。棒状粒子が矢印で示した押し出し成形の方向に良く配向している。さらに、この写真では一部の棒状粒子の中央に種結晶が見られているが、棒状粒子は種結晶を核としてコア-リム構造を取りながら成長するため、種結晶の配向性が最終焼結体にも引き継がれていることが分かる。

3. 機械的・熱的特性に及ぼす微細組織制御の効果

押し出し成型法による窒化ケイ素のヤング率は約 400 GPa(種結晶添加量)であり、一般的な窒化ケイ素の値($310 \pm 10 \text{ GPa}$)と比較して極めて高いものであった⁽⁵⁾。この値は一軸配向複合材料の複合則を用いて求めた理論ヤング率とほぼ等しいことから、種結晶添加と押し出し成形法の併用により、一軸配向に極めて近い配向を持つ微細組織が形成できることを示している。

種結晶に配向を与える成型法としてシート成形を行い、図1で示したものよりも更に柱状粒子を発達させた試料の熱伝導率は、成形方向で 155, 厚み方向で $52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ であった⁽⁶⁾。このシート成形方向に高い熱伝導率は、窒化ケイ素に置換固溶して点欠陥や転位の形成原因となる元素を焼結助剤から除き、フォノン散乱を抑制したことと、配向した棒状組織が粒子を取り囲む低熱伝導率のガラス相に対して熱伝導パスを形成したこととの複合効果と考えられる⁽⁶⁾。さらに、添加した種結晶から異方成長した棒状粒子は、透過電子顕微鏡による組織観察の結果、そうでない通常の粒子と比べて、転位密度が低いことが明らかにされている。このことは、欠陥の少ない種結晶の添加により、界面の不整合が少なくなり、熱伝導を阻害する転位密度が低減化された可能性を示唆している⁽⁷⁾。

4. 高強度・高靱性の同時発現のメカニズム

圧子圧入法により微小破壊現象を詳細に解析した結果、高強度高靱性窒化ケイ素では、粒子架橋現象が亀裂先端近傍 100 μm 程度の極めて微小領域で起こっていることが明らかにされた⁽⁸⁾。しかしながら、この寸法域は圧子圧入により系統的に寸法を変えることの出来る微小亀裂長さ以下であるため、圧子圧入法では亀裂進展抵抗曲線(R 曲線)は定量的に計測出来ない。そこで、走査電子顕微鏡(SEM)に負荷機構を組み込むことにより、亀裂伝播の臨界条件付近にある亀裂をその場観察する評価技術を利用した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。亀裂伝播経路で粒子架橋、粒子噛み込み、粒子引き抜き等のエネルギー散逸機構が形成されている場合には、それがない場合と比べて亀裂開口変位分布が小さくなる。これを SEM により精密に測定す

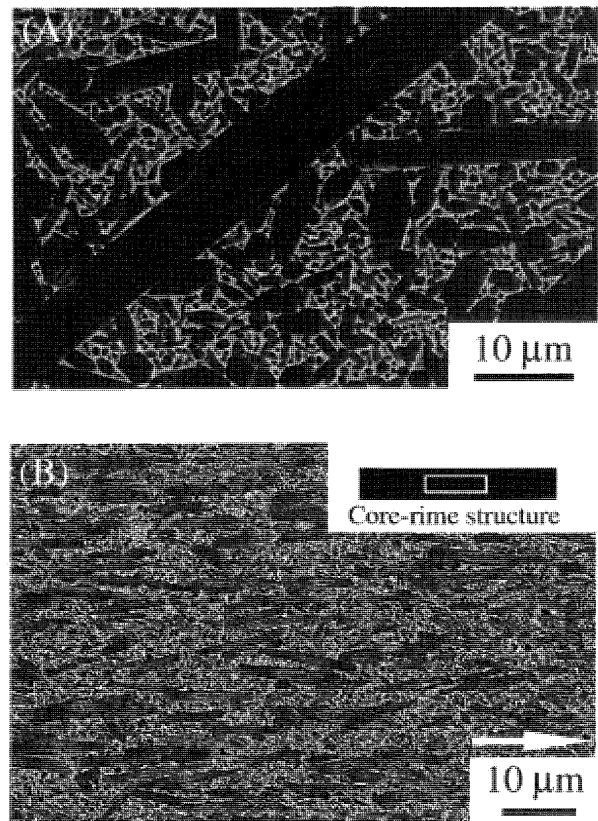


図1 窒化ケイ素セラミックスの微細組織 SEM 像：
(A)従来法によるランダム配向組織、(B)種結晶添加法と押し出し成形法を併用した一軸配向組織。矢印は押し出し方向を示す。一部の棒状結晶に核として作用した種結晶が見られている

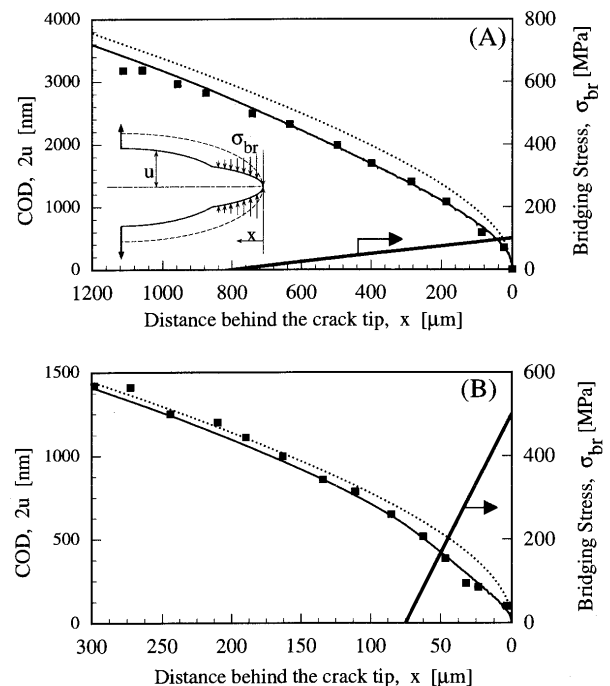


図2 亀裂その場計測による亀裂開口変位(左側 Y 軸)の亀裂縁分布。亀裂架橋応力の亀裂縁分布(右側 Y 軸)がデータと理論曲線(点線)との比較により見積もられた。(A), (B): 図1 参照

ることにより、エネルギー散逸機構をSEMが有する数十nmの分解能で定量的に解析することが出来る。

図1(A)(B)に示した2種類の窒化ケイ素セラミックスに対し、亀裂その場計測装置を用い亀裂開口変位分布の精密測定を行い、架橋応力分布を見積もった(図2)。ランダム配向した巨大棒状粒子からなる従来の高靱化窒化ケイ素(図1(A))では、亀裂先端に発生する最大架橋応力は約100 MPa、架橋応力が0となる亀裂先端からの距離として定義される臨界架橋長さは800 μm であるのに対し、微細棒状粒子を一軸に配向した試料(図1(B))で亀裂が配向方向と直交する方向に進展する場合には、最大架橋応力値は約5倍の500 MPa、臨界架橋長さは約1/10の75 μm であった⁽¹⁰⁾。これらの材料間ではいくつかの微視的基礎パラメータが同時に変化しているが、異方成長粒子の配向度が高いほど架橋密度が増大するために亀裂先端での最大架橋応力値は増大し、粒子寸法が小さいほど破面間相互作用長さが減少するために架橋領域長さは減少したと考えられる。

図3に、架橋応力分布から換算したR曲線(亀裂進展抵抗曲線)を示す。押し出し成型法により一軸に微細棒状粒子を配向した試料の架橋応力分布から換算したR曲線は、わずか75 μm だけ亀裂が進展する間に4.4から11 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ へと急激に上昇している。破壊強度を規定する欠陥寸法と同じオーダーでR曲線が急激に上昇すると、同じ亀裂進展抵抗値まで緩やかに上昇する材料と比べて、同じ強度を実現するための欠陥寸法の許容性が大きい。また、欠陥寸法が同じであれば破壊強度は高くなる。事実、破壊強度は、巨大粒子の場合には640 MPaであるのに対し、配向した微細棒状粒子では1400 MPaである。セラミック材料の高強度化に注目し、破壊靱性に影響を及ぼす2つの重要なパラメータである最大架橋応力値と架橋領域長さを見てみると、図4に示すように従来の高靱化セラミックスでは巨大粒子によって架橋長さを増大させることによって破壊靱性を向上させている。しかしながら、この場合には破壊強度の向上は図られなかった。これに対し、微小棒状結晶を配向させる方法では、亀裂先端近傍に高い架橋応力が発生すると同時に破壊源寸法を抑制できるので破壊強度も高めることができた。

5. おわりに

微細組織の制御によって引き出されたセラミックスの特性について概要を紹介した。本稿で紹介した材料は、セラミックスの最大の欠点である脆さの克服と高強度化を同時に達成するものである上に、熱伝導率も同時に改善する可能性を有している。ここでは紹介出来なかったが、名工研では、上述の材料系以外あるいは異なるアプローチから微細組織制御に基づく多機能が複合化したセラミックスの開発を行っている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。セラミックスにおける超塑性現象は名工研が世界に先駆けて発見したものであるが、これを材料の微細組織制御に利用するもので

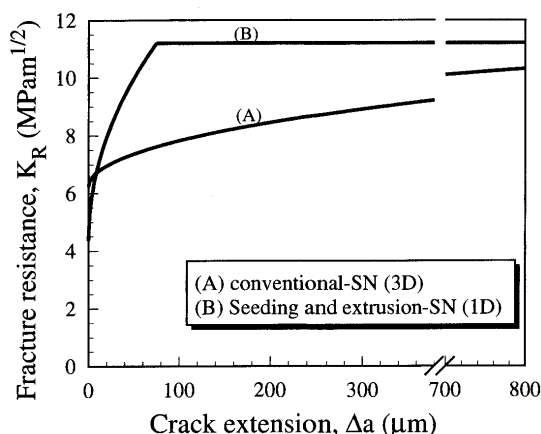


図3 亀裂に沿った亀裂架橋応力分布から見積もられた亀裂進展抵抗曲線(Rカーブ)。(A),(B):図1参照

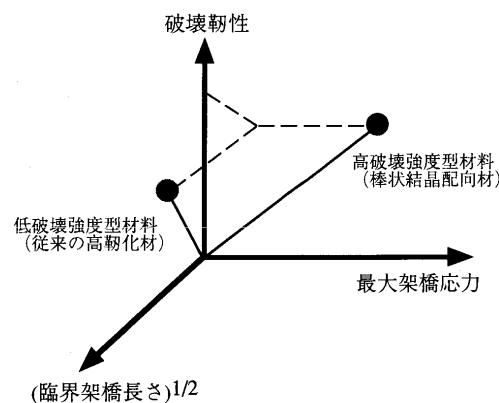


図4 高靱化度と架橋応力、臨界架橋長さの関係。高靱化はどちらのパラメータによっても可能であるが、高強度化を図るには、架橋応力を高めて高靱化することが必要

ある。機能設計に基づき多機能化を図る材料研究が構造用セラミックスでも既に始まっている。

引用文献

- (1) Hirao, K. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 77-7, (1994), p. 1857
- (2) Hirao, K. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 78-6, (1995), p. 1687
- (3) Imamura, H. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 投稿中
- (4) 手島博之ら, 日本セラミックス協会学術論文誌, 107-12, (1999), p. 1216
- (5) 宮島達也ら, 日本セラミックス協会'99年会講演予稿集, (1999), p. 308
- (6) 平尾喜代司, セラミックス, 33-4, (1998), p. 276
- (7) Brito, M.E. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 投稿中
- (8) Ohji, T. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 78-11, (1995), p. 3125
- (9) Röedel, J. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 73-11, (1990), p. 3313
- (10) 宮島達也ら, 材料試験技術, 43-1, (1998), p. 48
- (11) 宮島達也ら, 第43回日本学術会議講演会講演論文集, (1999), p. 95
- (12) 吉澤友一ら, 日本セラミックス協会学術論文誌, 106-1240, (1998), p. 1172
- (13) Kondo, N. *et al.*, J. Am. Ceram. Soc., 82-4, (1999), p. 713

ガスタービン基礎講座

— ガスタービンと燃焼工学 (1) —

前田 福夫^{*1}

MAEDA Fukuo

まえがき

ガスタービンは主に高温、高圧化により性能向上が計られてきたが、近年更に燃料多様化対応や大幅な NOx 低減等が計られている。前者は主に冷却や材料技術、後者は燃焼技術の進歩、適用によるものである。

ここでは燃焼技術の適用例として、ガスタービン燃焼器の特徴や基礎、燃焼試験や評価法を述べ、次回に実機適用例や燃料多様化対応の具体例について述べる。

1. ガスタービン燃焼器の概要と特徴

1.1 燃焼器の役割と要求性能

図 1, 2 にガスタービンの構成図と熱力学的サイクル概念図 (h-s 線図) を示す。この中で燃焼過程は 2→3 に相当し、燃焼器の役割は圧縮機出口状態 2 の高圧空気と燃料を燃焼器内に導入・燃焼し、燃焼後のガス温度を T_3 に昇温させることである。この過程の中で圧力は燃焼器の圧力損失特性により P_2 より P_3 に低下し、温度上昇 $T_3 - T_2$ は燃焼効率によって決まる。燃焼器の特性で、ガスタービンサイクル効率に関係するのはこの 2 つのパラメータのみである。これらの特性を含め、ガスタービンの構成機器として燃焼器に一般的に求められる要求性能は、A. H. Lefebvre⁽¹⁾により以下の様に簡潔に要約されている。

- 1) 燃焼効率が高い
- 2) 着火が容易
- 3) 火が消えない
- 4) 圧力損失が小さい
- 5) 燃焼振動等がなく燃焼安定性が良い
- 6) 燃焼器出口ガス温度分布が良い
- 7) 有害排気ガス成分が少ない
- 8) 製造及び補修費の安い構造
- 9) 信頼性が高く長寿命
- 10) 種々の燃料への対応が容易 等

1.2 燃焼器の評価パラメータ

上述の要求性能の指標として燃焼器性能を表わす幾つかの評価パラメータとその特徴を述べる。

1) 圧力損失 $\Delta P/P_2$ (%)

圧力損失は空気配分等と共に、燃焼器の全体特性に影響の大きい設計パラメータであり

$$\Delta P/P_2 = (P_2 - P_3)/P_2 \times 100$$

で定義される。 P_2 , P_3 は燃焼器入口, 出口全圧である。

圧力損失は主に燃焼器内筒等に設けられている空気配分用の開口面積 (2.3 項参照) やその流量係数、運転条件 ($G\sqrt{T/P}$, T_3/T_2 等)、壁面冷却法等によって決まる。また圧力損失の変化は流路抵抗の変化となるためタービンの冷却空気量配分にも影響する (図 1 参照)。通常、産業用ガスタービンの圧力損失は定格負荷付近で 3~6% 程度であるが、航空用では更に高めに設定される傾向にある。圧力損失率の増加はサイクル効率の低下 (図

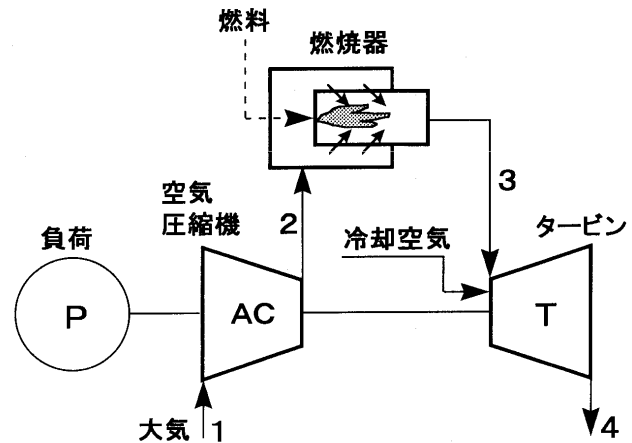


図1 ガスタービン構成図

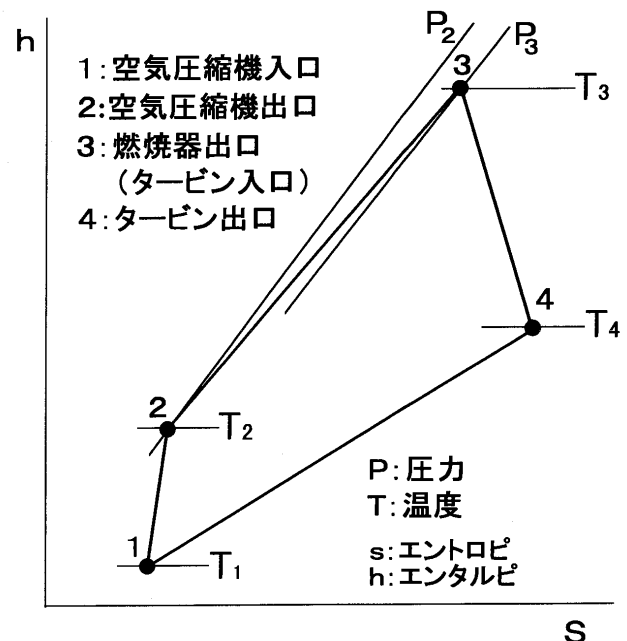


図2 ガスタービンサイクル

原稿受付 2000 年 1 月 31 日

* 1 (株)東芝 電力・産業システム技術開発センター
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4

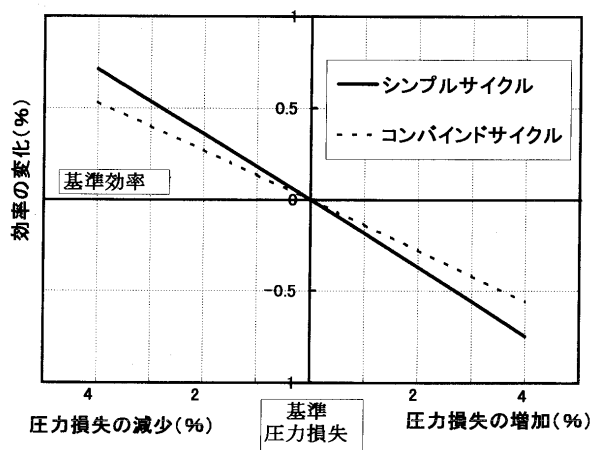


図3 燃焼器圧力損失の
ガスタービンサイクル効率への影響例

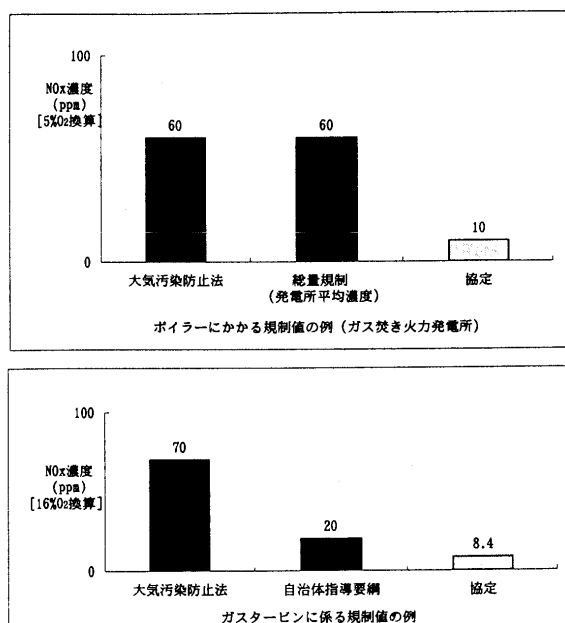


図4 国内のNO_x規制値例⁽¹⁾

3参照)を伴うデメリットはあるが、空気と燃料の混合促進や壁面冷却特性の向上、燃焼の安定化、NO_x低減、燃焼器出口温度分布の改良(均一化等)に有効である。

2) 燃焼効率 η_c (%)

燃焼効率は直接ガスタービンのサイクル効率に影響を及ぼすパラメータであり

$$\eta_c = Q_e / H_L \times 100$$

等で定義される。ここで Q_e は燃焼過程で発生した熱量、 H_L は燃料の低位発熱量である。サイクル効率向上のため広い負荷範囲で99%以上を達成する必要がある。通常、燃焼温度の低下や滞留(反応)時間の減少する運転条件時(例えば部分負荷運転時や多量の蒸気・水噴射時等)に低下する特性を示す。燃焼効率は排ガス成分中の未燃ガス成分であるCO、THC等の排出濃度で決まるため、逆にこれらの成分計測値より求めることができる⁽²⁾。

金属成分	タービンへの影響	許容値 (ppm)		処理の方法
		処理前	処理後	
Na+K	高温腐食 堆積	150	0.5-1	燃料洗浄 タービン洗浄
Ca	堆積	10	0.1	燃料洗浄 タービン洗浄
Pb	高温腐食	1	—	許容値遵守
V	高温腐食 堆積	150 (望ましくは100)	—	マグネシウム添加
Mg	バナジウム腐食抑制 堆積	バナジウム重量の3倍		スルホン酸マグネシウム 酸化マグネシウム 硫酸マグネシウム

図5 燃料中の金属成分の影響と処理⁽¹⁰⁾

3) 排ガス性状

燃料種や燃料の前処理法によって、燃焼排ガス成分中で問題となる有害ガス、灰、金属等の微量成分は大きく異なる。これらの成分は、環境への影響やガスタービン高温部品の信頼性向上の観点から図4,5に示す例の様に規制値や処理法が定められている。燃焼法のための改善によるこれらの低減には限界があり、必要により燃料処理や排ガス処理(脱硝、脱硫、脱塵等)との併用が計られている。

4) 燃焼器出口ガス温度分布

燃焼器の出口温度分布は、タービン第一段静翼、動翼の設計条件を示す一つのパラメータであり、静翼や動翼に対して出口温度不均一率 δs 、 δb として、それぞれ以下のように定義されている⁽¹⁾。

$$\delta s = (T_{3max} - T_3) / (T_3 - T_2)$$

$$\delta b = (T_{3\theta} - T_3) / (T_3 - T_2)$$

ここで $T_3 - T_2$ は図2参照、 T_{3max} は燃焼器出口最高温度、 $T_{3\theta}$ は燃焼器出口周方向平均最高ガス温度である。これら δs 、 δb の値は、タービン翼の冷却設計やタービン性能、信頼性の観点より所定の分布形状や制限値が求められている。

5) 燃焼安定性

燃焼器は全ての運転範囲で、燃焼不安定により燃焼振動や吹消えまたは逆火等が発生しないようにする必要がある。特に燃焼振動は燃焼現象と燃焼器構成機器の音響系とが共鳴して圧力変動(図6例参照)や機器の振動を併発する現象で、配管や構成部品の摩耗、クラック等のトラブル要因になりやすい⁽⁴⁾。また予混合燃焼を行う場合は逆火も誘発され易い。現状、燃焼振動の発生メカニズムの普遍的理解は得られていないが、予混合燃焼や水・蒸気噴射運転時に生じやすい特性がある。

6) メタル温度

燃焼器構成部品で火炎や高温の燃焼ガスにさらされる内筒や尾筒、燃料ノズル、スワロー等の構成部品は、運転条件や実績データを反映して冷却設計され、その金属材料の許容温度以下に維持されている。特に燃料を変える場合は、その組成の変化によって火炎の輻射率や燃焼速度が変化し、輻射伝熱量や火炎の位置が変化する。また燃焼器の圧力損失を低下させるような運転時(例えば $G\sqrt{T/P}$ の低下等)においても壁面の冷却効率が低下し、

メタル温度が上昇する。従ってこれらの変更を伴う運転時には注意が必要である。

1.3 燃焼器の形式と特徴

ガスタービン燃焼器はその形状やバーナ数、空気流れ等により分類（図7参照）できる。製造加工法や補修方法、実証試験法等に対してそれぞれ長所、短所⁽¹⁾があり、ガスタービンの構造や用途によって使い分けられている。

1.4 燃焼器の使用環境の変化

図8にガスタービンの高温化に伴う燃焼器内部の燃焼温度の変遷を示す。タービン入口温度（燃焼器出口温度）

の高温化は、冷却技術や材料の進歩による所が大きい、燃焼器にとっては主に冷却空気や希釈空気（図13参照）の減少で対応されてきた。近年多用されつつある乾式低NO_x燃焼器（DLNC）では、拡散燃焼と予混合燃焼が併用されるようになり、温度レベルの異なる複数の燃焼領域が存在するようになっている。燃焼域の大部分を占める予混合火炎の温度は、NO_xの発生しない温度以下（約1600℃）に設定されているが、一方タービン入口温度の高温化傾向のため、予混合火炎温度との温度差が減少している。これは今後更に高温化された場合、空気配分等の燃焼調整のみで低NO_xの維持が困難になりつつある事を示している。

図9に燃焼負荷率の実績値推移を示す。年々負荷率は上昇しており、種々の形式の燃焼器において、そのサイズは相対的に小型化してきていると言える。

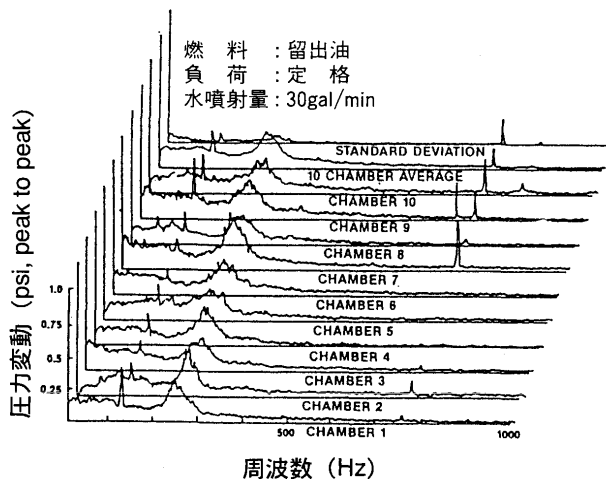


図6 多缶燃料器の燃焼振動の周波数分布例⁽¹⁰⁾

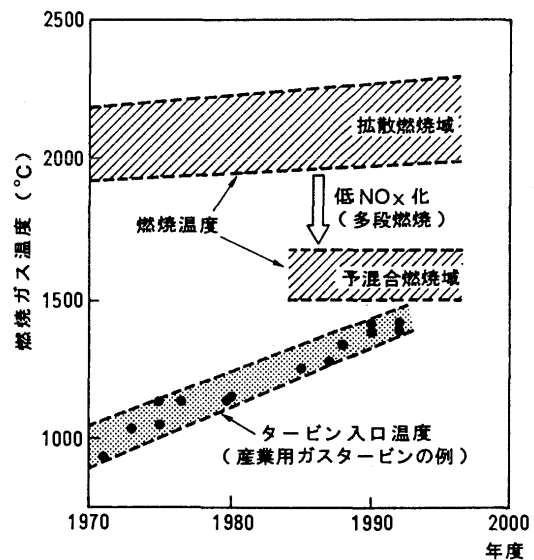


図8 燃焼温度の変遷⁽¹⁰⁾

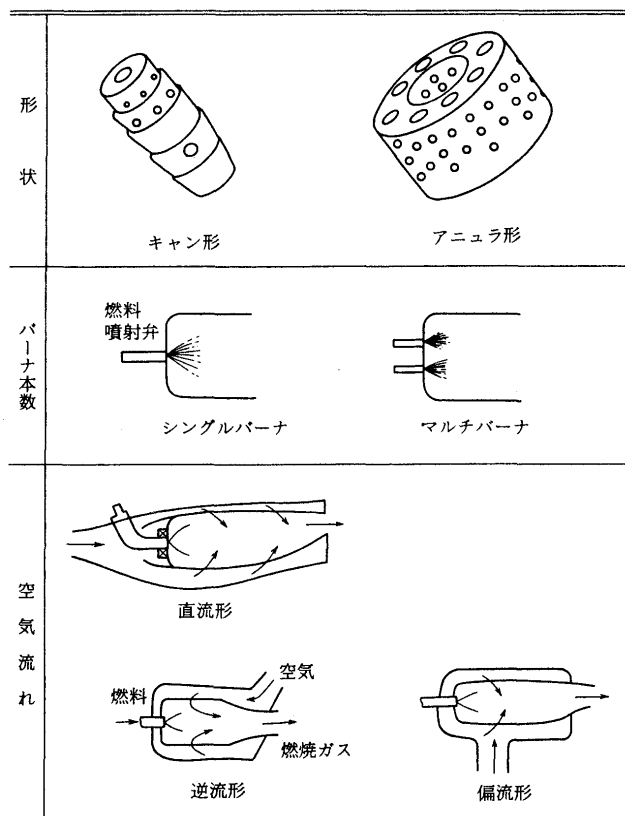


図7 燃焼器形式の分類⁽⁶⁾

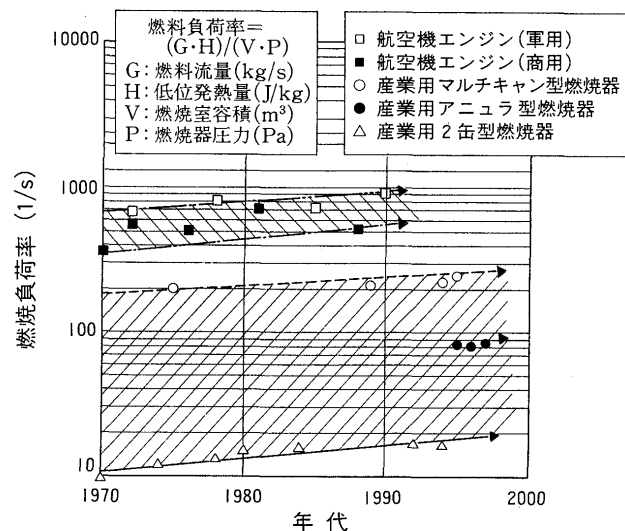


図9 燃焼負荷率の変遷⁽¹⁰⁾

2. ガスタービン燃焼器の基礎—I

燃焼器の設計時における主要な検討項目を述べる。

2.1 火炎の安定化 (保炎法)

図9に示すガスタービン燃焼器の燃焼負荷率は他の燃焼機器に比較してかなり高負荷 (ボイラ等の約100倍) で有り、その出口ガス流速は90 m/sec程度になっている。このような高速気流中での火炎保持は通常不可能である。そのためガスタービン燃焼器では図10に示すようなスワラを用いて燃焼域に循環流を形成し、その保炎機構⁽⁵⁾により安定火炎を形成・維持している。他の方法⁽¹⁾⁽⁵⁾により同様な保炎機構を形成することは可能であるが、ガスタービンではスワラが多く用いられている。

2.2 着火と火移り

図7に示す様な燃焼器の形式、構成により、着火法は

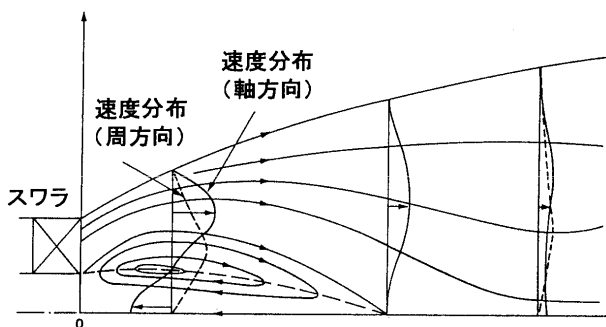


図10 スワラと循環流⁽¹⁾

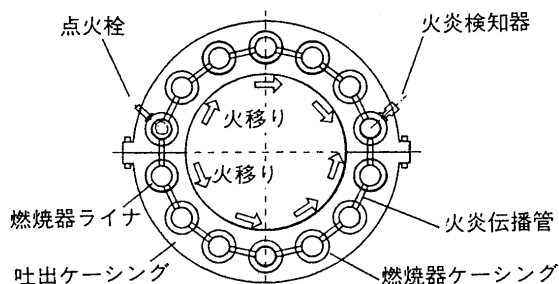


図11 多缶形燃焼器の火移り⁽¹⁰⁾

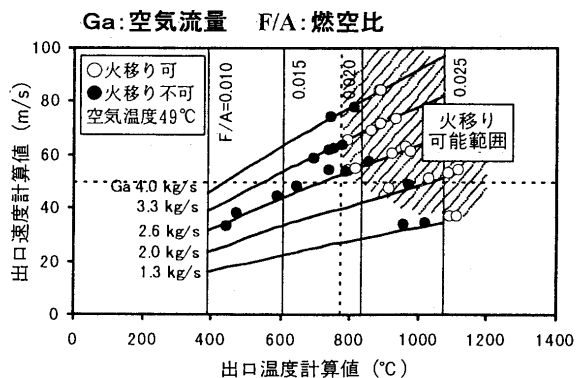


図12 火移り限界例⁽¹⁰⁾

それぞれ異なる。着火のための点火栓は、ガス燃料や液体燃料に対してもハンドリングの容易な電気式 (スパーク放電) が多用されている。また点火栓は着火性を向上させるため、燃料ノズルや燃焼域の循環流を考慮して燃焼域の最適位置に挿入される。単缶の燃焼器では一回の着火のみで良いが、図11に示す様な多缶型燃焼器構成の場合は、点火栓は通常全缶に装着されておらず、点火栓の無い燃焼器に火炎を伝播 (火移り) させる必要がある。火移り可能な条件としては、火炎伝播管出口のガス温度や流速等がクリティカルなパラメータになっていると考えられている (図12)。火移りを確認するため、通常火炎検知器が複数個装着されるが、形式としては火炎からの放射光の特性 (波長や光強度) を考慮して選定されている。

2.3 空気配分と燃焼条件

燃焼器に流入する全空気量と燃焼器各部への空気配分 (燃焼、冷却、希釈用等) は、圧力損失と共に燃焼器特性を左右する重要な設計指標の一つであり、燃焼安定性やNOx低減等燃焼性能向上のために行われる。

全空気量 G_a の調整方法としては、空気圧縮機の変入口案内翼による方法や、燃焼器に入る一部の空気をバ

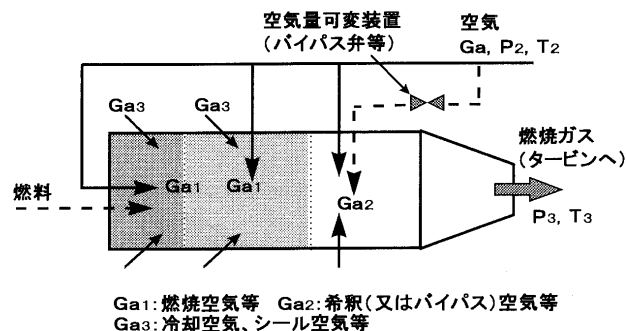


図13 空気配分例

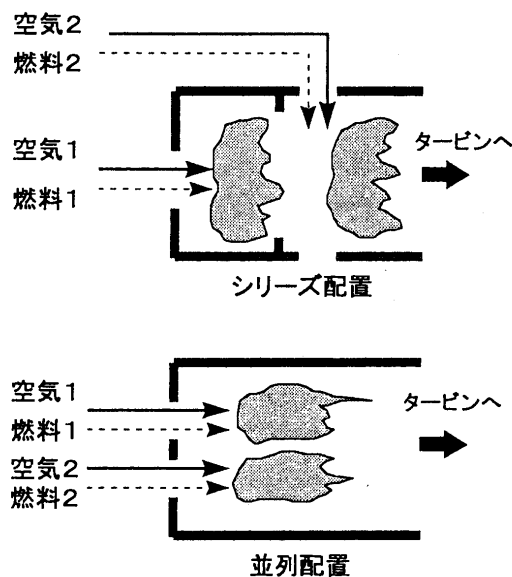


図14 ステージングと火炎配置⁽¹⁰⁾

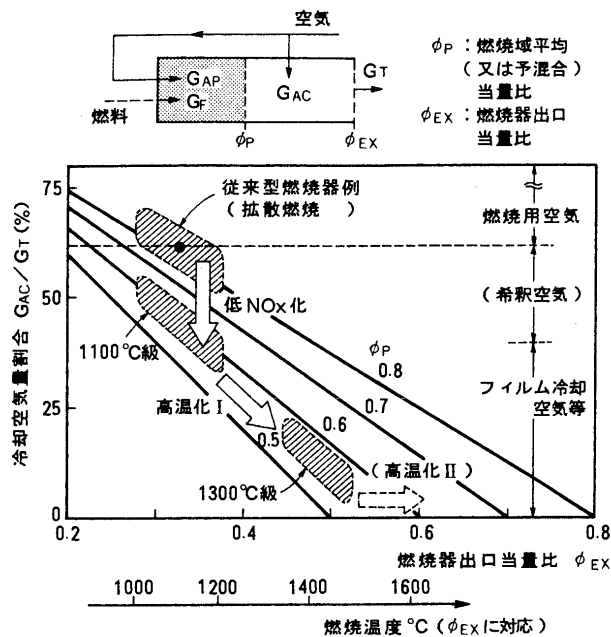
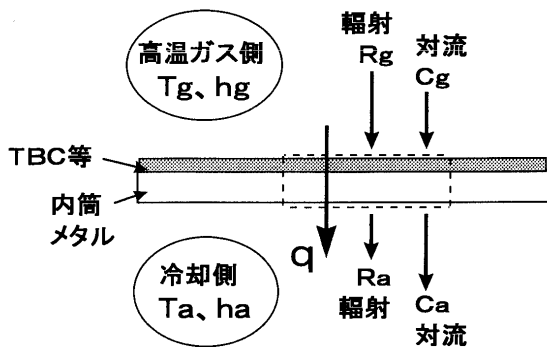
図15 低NO_x化、高温化と燃焼器壁面冷却空気量の関係⁽¹⁰⁾

図16 燃焼器壁伝熱モデル

イパス弁等の可変機構を用いて調整する方法 (図13) がある。また燃焼器各部への空気配分例として、近年実用化されたDLNCに採用されているステージングと呼ばれる方法がある。これは図14に示す様に燃焼用空気と共に燃料も分割供給し、燃空比を制御すると同時に、着火や各火炎の燃焼順序等も制御して広い負荷範囲で燃焼性の向上を計る方法である。また燃焼用空気や壁面冷却用の空気量配分は、燃料の種類や燃焼方式によっても大きく変化する。図15は天然ガス燃料を用いるDLNCで、高温化や低NO_x化に対応する燃焼条件を選定した場合の壁面冷却空気量 (または燃焼空気量) 配分の減少 (または増加) 傾向を示した例である。

通常、燃焼器各部へ燃焼用、壁面冷却用等の空気の適正配分は、内筒に設けられる空気口の配置によって行われる。各空気口 (面積 A_i) より流入したそれぞれの空気量 G_{ai} と全空気量 G_a の関係は次式で表わされる。

$$G_a = \sum G_{ai} = (\sum \alpha_i A_i) P_2 F / \sqrt{T_2}$$

ここで α_i , A_i は各空気口の流量係数、面積、 P_2 , T_2 は燃

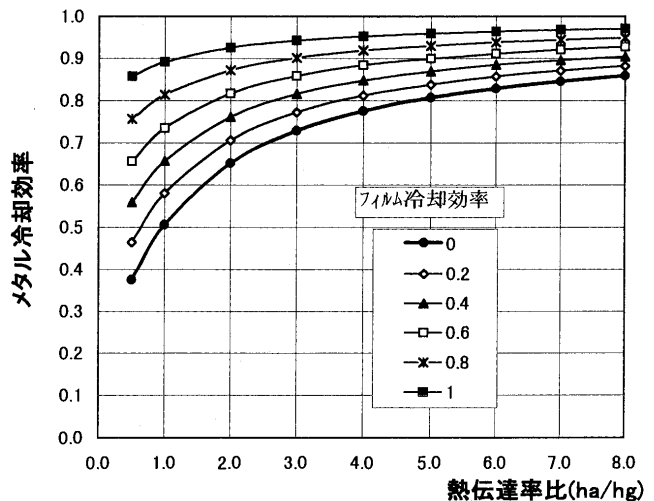


図17 メタル冷却効率例

焼器入口圧力、温度 (図2参照)、 F は圧力比 P_3/P_2 の関数である。 $(\sum \alpha_i A_i)$ または $G\sqrt{T_2}/(P_2 F)$ は有効開口面積に相当する。通常 $\sum A_i = A_t$ (総開口面積) として $\alpha = (\sum \alpha_i A_i)/A_t$ または $G_a\sqrt{T_2}/(A_t P_2 F)$ で求められる平均流量係数は、空気口形状やレイノルズ数の関数であるが0.6~0.8程度の値である。また前述の燃焼器圧力損失特性は αA_t の選定でほぼ決まる。

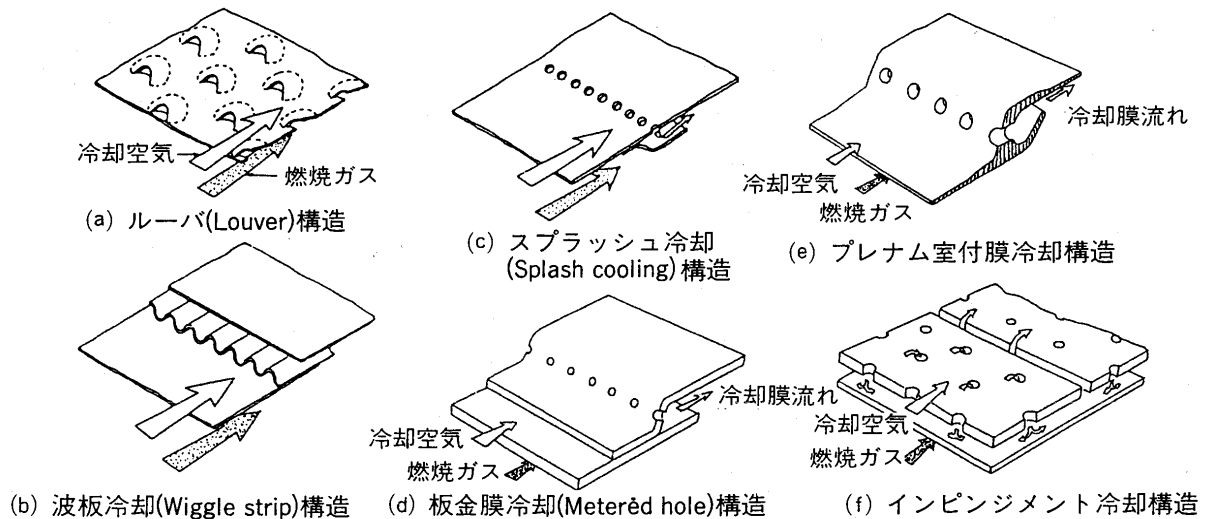
2.4 壁面冷却法

燃焼器内筒や尾筒の内側は、現状では2000℃~1500℃程度的高温ガス (図8参照) にさらされているが、外側は通常空気 (300℃~400℃) で冷却され、内筒等のメタル温度は材料許容温度以下に維持されている。図16にこのメタル温度を決める伝熱モデルを示す。メタル温度は以下の関係より求めることができる。壁面を通過する伝熱量 q は等しいので

$$\begin{aligned} q &= Rg + Cg && \text{ここで } Cg = hg(T_g - T_1) \\ &= \lambda_1/T_1(T_1 - T_2) = \lambda_2/T_2(T_2 - T_3) \\ &= Ra + Ca && \text{ここで } Ca = ha(T_3 - T_a) \end{aligned}$$

ここで Rg , Ra 及び Cg , Ca , hg , ha は高温ガス側、冷却空気側の輻射伝熱量及び対流伝熱量、熱伝達率である。 λ_1 , t_1 , λ_2 , t_2 はサーマルバリアコーティング (TBC)、内筒メタルの熱伝導率、板厚である。また T_1 , T_2 , T_3 はそれぞれTBC、メタルの表面温度である ($T_1 > T_2 > T_3$)。熱伝達率 h や輻射伝熱量 R については文献⁽¹⁾等に多くの実験式が提案されているので参照願いたい。フィルム冷却が併用されている場合は、フィルム冷却効率 $\eta_f = (T_g - T_{ad})/(T_g - T_a)$ より T_g を T_{ad} に置換して求めることができる。メタルの温度 (例えば T_2) をメタル冷却効率 η_m として $\eta_m = (T_g - T_2)/(T_g - T_a)$ で定義すると、メタルの冷却特性は図17の様に表わすことができる。

例えば $T_g = 1600^\circ\text{C}$, $T_a = 400^\circ\text{C}$ の条件でメタル温度 $T_2 \leq 800^\circ\text{C}$ にするためには、冷却効率 $\eta_m \geq (1600 - 800)/(1600 - 400) = 0.67$ を実現する冷却構造を採用すれば良い。もしフィルム冷却が併用できれば (構造例図18参

図 18 燃焼器ライナの各種冷却構造例⁽¹²⁾

照) 比較的横軸 ha/hg に関係なく $\eta_m \geq 0.67$ は可能である。しかしフィルム冷却が併用できない場合 ($\eta_f = 0$) は、約 $ha/hg > 2.2$ の条件を満足できる冷却方式が必要になる事等がわかる。現状の高温化に伴う DLNC の燃焼条件等では、既に図 15 に示されている (高温化 I, II 領域) 様にフィルム冷却が併用できない条件に迫りつつあり、 ha/hg を増大できる冷却構造や他の冷媒 (例えば蒸気等) を利用した新しい冷却システム等が必要になっている。

しかし現実の冷却設計時においては、燃焼条件に対応した火炎の挙動が明らかでない場合が多く、高温ガス側における T_g , h_g , R_g の値と位置が不正確となり、経験値や実験結果を利用した相互補完等が必要である。

2.5 燃焼器材料

燃焼器の高温ガスにさらされる部品は薄板構造が多いため、高温強度や耐食・耐酸化性、耐熱疲労性等と共に板金加工性や溶接性が要求される。現在は HA 188 や Nimonic 263, Hastelloy-X, Tammilloy 等の圧延材が使用されている。単缶式等の大きな燃焼器では、セラミックや金属タイル等も使用され材料、構造の選択の自由度が比較的大きい。また近年の高温化に対応して、TBC の遮熱特性や耐久性の向上も計られつつあり、更にその適用範囲の拡大が望まれる。耐熱材料の進歩は、複雑な冷却構造で得ている高い冷却効率を必要としないため、シンプルで補修性の良い構造が得られ、また壁面冷却のための圧力損失を減少できる。従って耐熱材料や TBC の耐熱性の向上は構造の簡素化、信頼性向上、性能向上等に寄与でき、その効果は大きいと言える。

3. 燃焼器の基礎—II

燃焼器の開発や性能評価に関連する実証試験法、燃焼計測、燃焼解析等の概要を述べる

3.1 燃焼器の開発・設計

図 19 に燃焼器の開発設計やその性能検証、評価等に

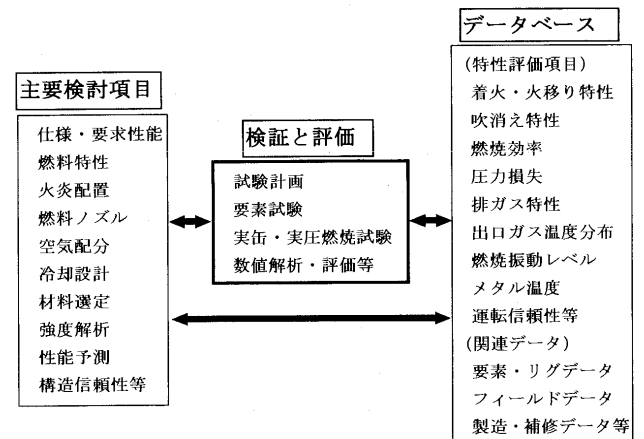


図 19 燃焼器の開発、評価および検証

についての相互関連を示す。現状においても燃焼器特性や性能の検証は、実缶 (フルサイズ) を用いた実圧燃焼試験による以外に方法が無い。そのため、これまでの燃焼器開発は主に燃焼実験と経験を含むその評価技術等によって行われてきた⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしこれらの試験では、巨大な試験設備と資源を必要とするため、燃焼解析の有効活用や燃焼計測の利用をはじめ、要素試験や実証試験計画による効率的な試験の実施、評価が望まれている。

3.2 実証試験法

図 20, 21 に実圧燃焼試験設備系統図と燃焼器テストリグ例を示す。通常このような設備では、図 19 に示す特性評価項目を求めるための必要なデータがオンラインで計測されている。基本的な計測量はガスサンプリング、定常及び変動圧力、温度や火炎画像であり、これらのセンサー、計測法の特徴等はそれぞれの解説書⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾を参照願いたい。ここでは実証試験時の一般的な 2, 3 の留意点を示す。

1) 境界条件

実缶を用いた実圧燃焼試験で得られる燃焼器の特性

データ (図 19 参照) は、実機とほぼ同一である。しかし燃焼器のタイプや形状に依存するが、試験装置における焼器等の組立て境界条件は、必ずしも実機条件と同一にできない場合がある。これらの影響を受け易い評価項目 (例えば燃焼振動等) や条件については、ラボとフィールドデータとの差異に関する経験値等を利用した検討評価も必要である。

2) 排ガス成分

NO_x 等の排ガス計測濃度は、大気湿度や入口空気温度等の運転条件の変動に対応して変わり、同じ燃焼温度であっても日時によりデータがバラツク結果となる。そのため大気湿度等については換算式を決め、基準条件に変換後の比較が望ましい。また NO_x 等の酸素濃度換算についても常に基準の濃度 (例えば 16%) の換算値表示が相互比較のために便利である (逆に換算表示のない濃度では比較評価が不可能)。また成分濃度の表示法は適用機種によって慣習的に異なり (g/kg-fuel, ppmvd 等), 換算比較⁽⁷⁾等が必要である。

3) 計測値

近年の高温、高圧化の傾向は計測の環境も厳しくしつつある。特に燃焼器出口ガス温度 (1500℃ を超える) の計測では輻射の影響、内筒のメタル温度計測等では周辺の冷却や加熱条件が強化されているため、熱電対の取り付け方法等の差異により、計測値にバラツキや誤差が生じ易くなっている。また予混合燃焼の適用等により燃焼振動の計測も多くなっているが、変動圧力計測についてはセンサーの取付法や、その前後の導圧配管の影響等の考慮も必要である。

3.3 燃焼計測と燃焼解析

計測を配慮して設計される試験装置では流速、温度、濃度、火炎可視化等に対して多くの燃焼計測法⁽⁶⁾の適用が可能であり、既に要素試験や実証試験に用いられてきた。近年は非接触の計測法として、ラジカル自発光やレーザによる散乱、誘起蛍光等の利用、また高感度・高速度 CCD カメラや画像処理法等を用いた火炎挙動に関する研究が盛んに行われている。これら計測法の特徴や問題点についてはそれぞれの解説書⁽⁶⁾⁽⁸⁾を参照願いたい。実機や実証試験装置においては、その計測環境が極めて悪いため、現状これらの一部の燃焼計測方法しか適用できていない。そのため使用環境を選ばない、小型で簡便な計測法の開発、実用化が期待されている。

また燃焼器の開発や評価には、燃焼計測等の実験技術と共に燃焼解析技術が必要である。燃焼解析は、燃焼器内部の流れや温度分布、排ガス成分等を様々の観点から、早くしかも正確に知る事ができる可能性がある。従って精度の良い実用的な燃焼解析が可能であれば、多くの資源と時間をかけて行われている燃焼器等の開発、評価を効率的に実施できる可能性がある。これらの要求と近年の計算機の進歩を背景に、燃焼解析研究が現在も積極的に行われていると考えられる。しかし現状、実機への適

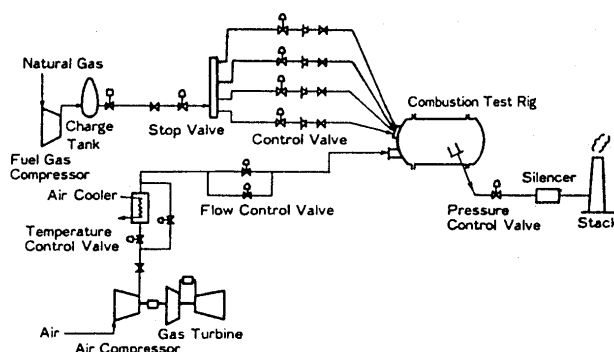


図 20 燃焼器実圧燃焼試験設備系統図⁽¹³⁾

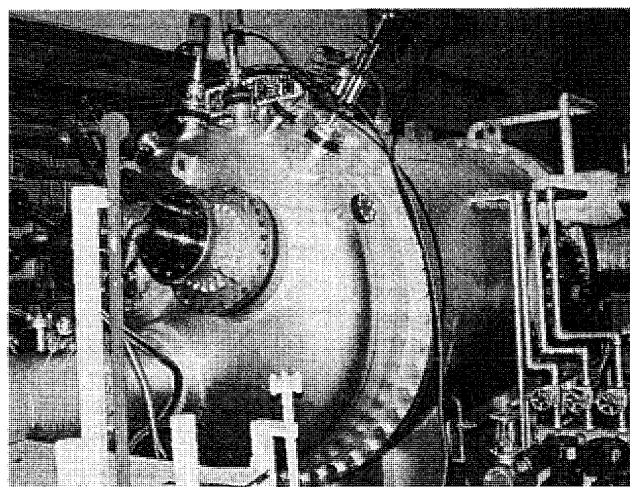


図 21 燃焼器テストリグ⁽¹³⁾

用例としては、燃料の混合や燃焼反応を含まない計算は設計支援に役立っているが、燃焼を含んだ解析は実用レベルにあるとは言い難い状況にある。これには2つの理由が考えられる。まず計算結果の比較・検証等に必要な燃焼場の詳細な計測データの不足がある。近年発達しつつあるレーザ計測を利用した燃焼計測においても、データ取得法にそれぞれ技術課題があり、精度の良い十分な詳細データが取得できていないと考えられる。他の理由としては通常の流体現象に付加される以下のような燃焼現象の特徴とそのモデル化⁽⁹⁾の問題点が考えられる。

- * 多相系や多成分系
- * 複雑で多くの化学反応を含む系
- * 大きな発熱と密度変化、輻射伝熱を含む系
- * 反応速度、反応領域に関する大、小の時間、空間スケールが混在 等

これらを考慮した詳細な三次元解析等は、現状ではほとんど不可能と考えられている⁽⁹⁾。一方で、既に燃焼器は一部の気体燃料や液体燃料に対して所要の性能をクリアし実用化されてきた。これは解析的なアプローチによる燃焼の解釈や理解は不足しても、燃焼器の性能評価に必要なデータを入手できる試験設備や計測技術、評価法の進歩、経験の蓄積等による。しかし燃焼解析技術の波及効果は大きいため、反応や流れの簡略化等を含め燃焼

解析手法の開発が進められており、新しい燃焼計測法と共にこれらの早期実用化が期待される。

参考文献

- (1) A.H.Lefebvre, Gas Turbine Combustion, (1983), Tayler & Francis
- (2) 水谷幸夫, 燃焼工学, (1989), 森北出版
- (3) 鈴木邦男, 田丸卓, 堀内正司, 斎藤隆, 航空宇宙技術研究所報告 TR-208 (1970)
- (4) 鈴木邦男, 機械技術研究所報告第 129 号 (1983)
- (5) A. K. Gupta, Swirl Flows, (1984), Abacus Press
- (6) 日本機械学会, 燃焼工学ハンドブック, (1995)
- (7) 佐々木正史, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 23, NO. 89, (1995), pp. 28
- (8) 日本機械学会, 燃焼のレーザ計測とモデリング, (1987)
- (9) 竹野忠夫, 香月正司, 日本機械学会誌, Vol. 97 No. 904, (1993), pp. 10
- (10) 前田福夫, 小林成嘉, 古賀勉, 山本隆夫, 木村武清, 火力原子力発電協会誌(特集号), Vol. 50, No. 517, (1999-10), P. 144
- (11) 筒井康賢, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 23, NO. 89, (1995), pp. 16
- (12) 吉田豊明, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 27, No. 6, (1999-11), pp. 22
- (13) H. Okamoto, F. Maeda, Y. Iwai, M. Itoh, T. Takahara, 95 - YOKOHAMA-IGTC-138, (1995)
- (14) A. A. Putnam, Combustion Driven Oscillations in Industry, (1971), American Elsevier Pub. Co.

水素燃焼タービン 1700℃ 級ハイブリッド型冷却翼翼列評価試験

Hydrogen Combustion Wind Tunnel Test of 1700℃ Class Turbine Cooling Blades

伊藤 勝康^{*1}

ITO Shoko

松田 寿^{*1}

MATSUDA Hisashi

古閑 昭紀^{*1}

KOGA Akinori

須賀 威夫^{*1}

SUGA Takeo

川岸 裕之^{*1}

KAWAGISHI Hiroyuki

岡村 隆成^{*1}

OKAMURA Takanari

Abstract

This paper describes the development of 1700℃ class first stage turbine cooling blade applied to hydrogen fueled combustion turbine system with output of 500 MW and thermal efficiency over 60% (HHV) in World Energy Network (WE-NET) program. The conceptual design of those cooling blades, which were served in hot steam flow, was carried out. The hybrid cooling method combining closed circuit passage with a partially open circuit one was chosen among several cooling systems from a point of plant efficiency and durability of cooling blades. The several elemental tests such as outer heat transfer coefficient on airfoil, internal heat transfer one in cooling channel and then evaluation of single crystal super alloy and thermal barrier coating (TBC) in hot steam environment were conducted. Finally the experiment of scale model test blades for the first stage stator and rotor blades were carried out using hydrogen-oxygen combustion wind tunnel with practical steam condition of 1700℃ and 2.5 MPa. The cooling efficiency and metal temperature distribution of test blades and the soundness of TBC and blades substrate were clarified.

1. はじめに

国家プロジェクト WE-NET (水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術: World Energy Network) における水素利用技術の一つとして, 水素燃料を利用したゼロエミッション発電システム開発があり, 熱効率 60% (HHV) 以上の 1700℃ 級水素燃焼タービンプラントの開発を目標にしている⁽¹⁾。このためにはタービンプラント高温化に対応する 1700℃ 級タービン冷却翼翼開発が重要課題である。当社は, WE-NET プロジェクトの冷却翼翼開発計画に参画して, 冷却システムを含めたタービンプラントシステムのフレーム設計と, これに適用するタービン冷却翼の開発を実施してきた。冷却翼の開発は, 翼外面および内面の伝熱特性試験⁽²⁾⁽³⁾, 翼基材 (単結晶合金) および TBC (遮熱コーティング) の耐環境評価試験等の要素試験結果を反映して, スケールモデルの評価試験翼を設計・試作した。更に試作した試験翼は, 水素燃焼翼翼試験装置にて 1700℃ での冷却性能試験を実施し評価した。

本稿では, 水素燃焼タービンシステムにおいて所定のプラント性能を満たしつつ 1700℃ の高温化に対応できる冷却方式の選定と, 開発したタービン初段静翼, 動翼

の水素燃焼翼翼評価試験の結果について述べる。

2. 冷却方式の選定と冷却構造

1700℃ 級水素燃焼タービン用冷却翼翼開発において, 想定したタービンシステムのフレーム設計構成を図 1 に示す。システムは, 水蒸気を作動媒体としたブレイトンサイクルとランキンサイクルを組合せたコンプレックスサイクルである。対象である高温タービンはブレイトンサイクル中にあり, タービン入口部で 1700℃, 4.75 MPa

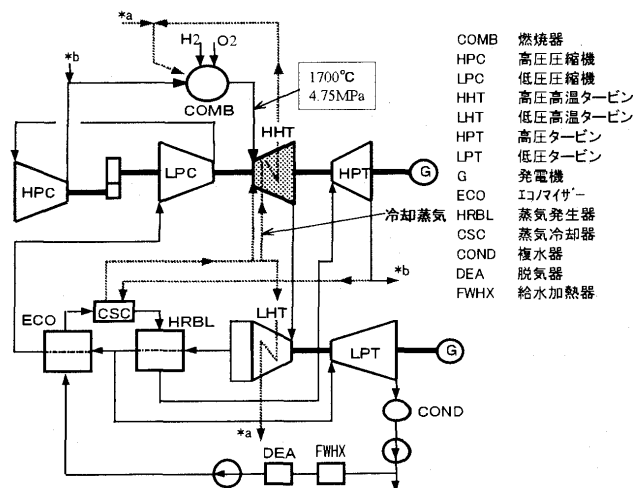


図1 水素燃焼タービンシステムの構成

原稿受付 1999年10月15日

*1 (株)東芝 電力システム社

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2丁目4番地

の水蒸気が供給される。高温タービンの冷却蒸気は、高圧タービンで膨張した蒸気の一部を冷却器で冷却して供給される。更に冷却後の蒸気は燃焼器前に回収され、燃焼用蒸気と混合される。プラント性能上、冷却蒸気は全量回収されることが望ましいが、タービン入口温度が1700℃もの高温になると、特に初段の冷却翼の場合、回収冷却だけでは冷却翼に対する熱負荷が過大になり、翼基材およびTBCの信頼性に問題がある。そこで筆者等は、回収冷却を基本にしながらも一部吹出しフィルム冷却を併用して、熱負荷を減少させるハイブリッド冷却方式を提案した。図2、図3に1700℃級タービン初段冷却静翼と動翼の冷却構造を示す。なお図中の冷却翼は、翼列評価試験用のモデル翼を示すが、実機においても基本的な冷却構造は同一である。タービン静翼・動翼共に熱負荷の大きい前縁部と後縁部に吹出し冷却を用いており、中間部は内部からの対流で冷却している。また、内部冷却通路には傾斜タイプの伝熱促進リブを採用して熱伝達率増加を図っている。翼は精密鋳造にて冷却通路も一体で製作しているが、静翼に関しては内部にインサートを配置することで冷却通路を構成する構造となっている。フィルム冷却孔は、冷却効果の大きいディフュージョン形状を採用し、レーザ加工と放電加工で形成した。翼

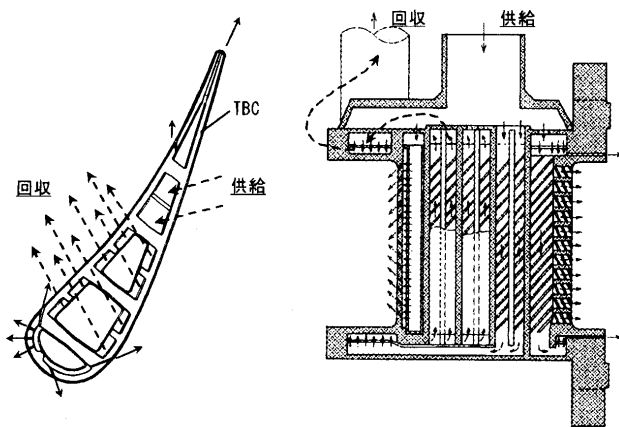


図2 静翼冷却構造 (評価試験)

表面にはTBCを施工し、翼基材への熱負荷低減を図っている。表1に実機翼と試験翼の設計要項をまとめた。

3. 水素燃焼翼列評価試験装置

翼列評価試験装置の構成と試験系統を図4に示す。同図は静翼における翼列試験構成を示すものである。翼列は、計測翼と翼列側壁を形成する両サイドの側壁翼から構成されており、通路数は2である。ボイラで発生した蒸気は燃焼用蒸気、翼冷却用蒸気およびシール用蒸気として、流量調整されて試験装置に供給される。翼列部の上流と下流に設置される接続ダクトおよび出口ダクトは、水冷却されており高温・高圧環境下でも問題無いよう設計されている。また、排気ダクトの大気放出口には、減圧オリフィスが設けられ試験圧力が確保されている。計測翼に供給される冷却蒸気は流量計測されており、更に主流中に吹出した冷却蒸気を除いた回収蒸気量も流量計測されている。シール蒸気は、翼列部において主流の高温蒸気が翼列通路外に廻り込むのを防止するために供給されている。なお、動翼試験に関しても試験装置構成および系統は、静翼の場合と同一である。但し動翼の場合、翼列は5枚で構成され、通路数は4である。図5に静翼試験装置の翼列部を上流側から見た状態を示す。(注：1700℃試験後の状況)

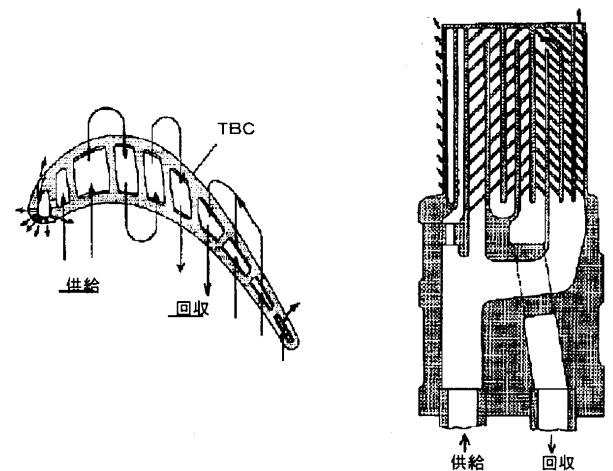


図3 動翼冷却構造 (評価試験)

表1 設計要項

	初段静翼		初段動翼	
	評価試験翼	実機翼	評価試験翼	実機翼
主流蒸気				
入口平均温度 [°C]	1700	1700	1570	1570
入口最大温度 [°C]	1809	1809	1641	1641
入口平均圧力 [MPa]	2.44	4.74	2.44	3.71
出口レイノルズ数	1.8×10^6	6.5×10^6	0.6×10^6	1.8×10^6
出口マッハ数	0.68	0.68	0.46	0.46
冷却蒸気				
供給温度 [°C]	350	350	350	374
流量比 [%]	6.7	6.4	7.0	6.9
翼列形状				
有効部スパン [mm]	40	71	40	71
P/Dコード [mm]	79	141	36.6	64.5
翼間数	2	38	4	92
翼基材				
	FSX-414	CMSX-4	CMSX-4	CMSX-4
TBC				
材質	$ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$		$ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$	
TBC厚さ [mm]	0.2		0.15	

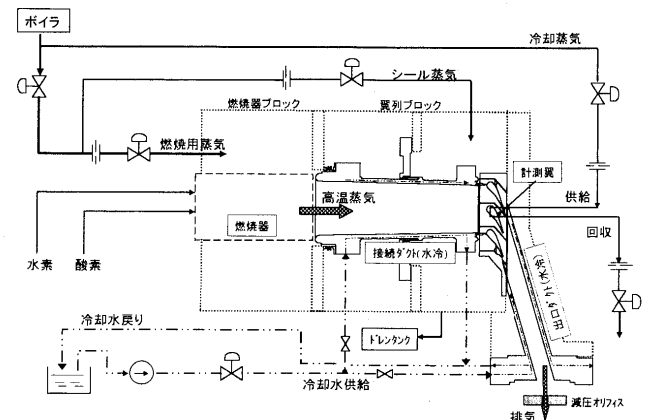


図4 翼列評価試験装置と試験系統

翼列に流入する主流蒸気の温度を、接続ダクトに設けた全温計測プローブで、高さ方向に5点計測している。冷却蒸気系では、前記供給・回収流量の他に供給および回収の温度・圧力も計測している。メタル温度は、50%高さ断面の翼面周囲とその他高さ方向にも計測している。更に静翼エンドウォールおよび動翼プラットホームのメタル温度も計測している。図6に静翼と動翼の50%断面におけるメタル温度計測位置を示す。なお翼メタル温度は、シース外径0.5mm（一部0.25mm）のK型熱電対を埋め込んで計測しており、熱電対を埋め込んだ後から翼面にTBCを施工している。

4. 試験結果と評価

試験は、静翼および動翼に関して、(1)主流温度1000℃で冷却蒸気流量（吹出し、回収）に対する冷却特性を把握する冷却特性試験、(2)1700℃定格温度で計画した冷却性能を実証する温度上昇試験の2ステップで実施した。なお主流温度の公称値は、燃料流量と蒸気流量により計算される理論燃焼温度 T_{gth} で整理してある。表2に実施した試験条件範囲を示す。

4.1 冷却特性試験結果

理論燃焼温度 $T_{gth}=1000^{\circ}\text{C}$ の主流状態で、冷却蒸気量の変化に伴う冷却効率への影響を調べた。冷却蒸気量

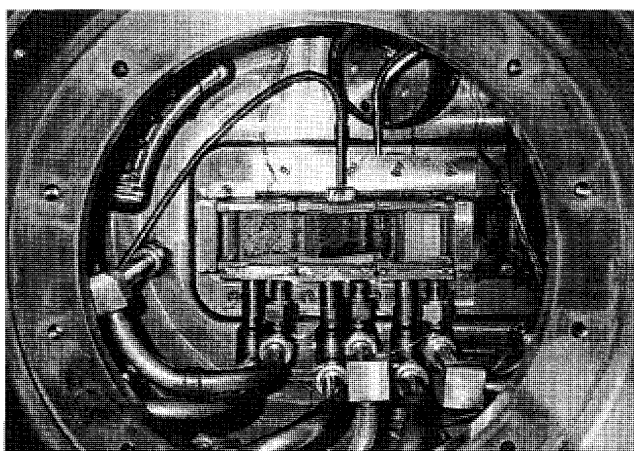


図5 静翼試験部状況（試験後に上流部より見る）

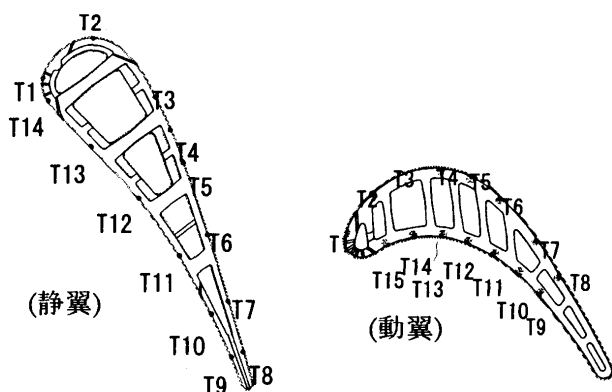


図6 メタル温度計測位置（50%断面）

の変化は、以下の3ケースに関して試験を実施した。(a)回収流量 $G_c 1$ と吹出し流量 $G_c 2$ の割合が一定の状態、総供給量 G_c を変化、(b)吹出し流量 $G_c 2$ 一定の状態、回収流量 $G_c 1$ だけ変化、(c)回収流量 $G_c 1$ 一定の状態、吹出し流量 $G_c 2$ だけ変化

試験で得られる50%高さ断面の局所冷却効率 η_{m_i} は、以下の定義により算出した。

$$\eta_{m_i} = (T_g - T_{m_i}) / (T_g - T_c)$$

ここで T_g は50%高さ位置における全温プローブ計測値、 T_{m_i} は50%断面の翼メタル熱電対計測値、 T_c は冷却蒸気供給温度を示す。また冷却蒸気流量の変化は、以下に示す主流流量 G_g に対する比率で定義した。

$$\text{供給流量比 } \phi = G_c / G_g, \text{ 回収流量比 } \phi_1 = G_{c1} / G_g, \text{ 吹出し流量比 } \phi_2 = G_{c2} / G_g$$

図7(a)(b)(c)に静翼試験、図8(a)(b)(c)に動翼試験における各ケースの冷却効率分布の変化状況を示す。また、同時に予測計算による冷却効率分布の変化も示す。(a)のケースでは流量変化に対して、静翼および動翼共に冷却効率が翼全域でほぼ同じ割合で変化している。(b)のケースでは回収流量変化に対して、静翼および動翼共に翼の中央部で変化が大きく、前縁・後縁部ではほとんど変化しない。(c)のケースでは吹出し量変化に対して、静翼および動翼共に翼中央部に比較して前縁・後縁部での変化が大きい。これら(a), (b), (c)各ケースの傾向は、予測計算と良く一致しており、試験翼の冷却蒸気の流量配分、フィルム冷却特性および内部冷却特性がほぼ計画通りで、正常に冷却されていると推察される。また冷却効率のレベルは、翼背側で予測値より高い傾向を示しているが、フィルム冷却特性が予測値より良好であると推定される。なお予測値は、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを組込んだ2次元境界層解析コード⁽⁴⁾による翼面熱伝達率分布、翼内部冷却通路1次元流動解析による内面熱伝達率分布および実験に基づくフィルム効率データベースによる翼面主流温度分布から、3次元熱伝導モデルでメタル温度分布を計算した。

4.2 1700℃ 温度上昇試験結果

主流蒸気温度の上昇に伴い、翼メタル温度も同様に上昇する。この結果を冷却効率に換算した結果を静翼・動翼に関して図9と図10に示す。試験結果は、冷却蒸気量の設定値が各主流温度毎に若干異なるため、正当な比較が難しいが、主流温度変化に対する冷却効率変化の顕著な傾向は認められない。計算結果も同様に、主流温度

表2 評価試験実施条件範囲

項目	静翼試験	動翼試験
主流蒸気入口平均温度	1000~1780℃	1000~1778℃
主流蒸気入口平均圧力	~2.72MPa	~2.64MPa
主流出口レイノルズ数	~ 2.1×10^6	~ 0.82×10^6
冷却蒸気供給温度	~300℃	~291℃
冷却蒸気供給圧力	~3.33MPa	~3.61MPa
冷却蒸気供給流量比	6.0~7.5%	6.2~7.8%

変化の影響による冷却効率変化は小さい。

次に、定格温度における静翼と動翼のメタル温度分布を図11と図12に示す。また図中には予測計算によるメタル温度分布とTBC温度分布も示した。試験で得られたメタル温度計測値は、熱電対の埋め込み位置を考慮してメタル表面に換算した値である。静翼試験において、試験経過と共に腹側の一部で冷却性能が低下する傾向が見られた。試験後の検査より、この腹側の部位には付着物が観察され、更にこの付着物により翼面の粗度が増大しているのが計測された。これより翼表面の乱れが促進され熱伝達率が増大し、定格試験での冷却性能は初期状態より低下していると判断された。このため図11に示す静翼メタル温度は、1000℃冷却試験での初期状態冷却効率より換算して求めた分布である。この操作は、前述のように主流蒸気温度変化に対して冷却効率がほとんど変化しないことから妥当と考えられる。結果は、予測と良く一致している。動翼試験では、付着物の影響は少なく、定格試験の結果は予測と良く一致している。

4.3 冷却蒸気流量特性

翼内部冷却蒸気の流量特性を静翼および動翼に関して調べた結果を、図13と図14に示す。今回の一連の試験において計測された冷却蒸気の供給圧力、回収圧力、供給温度、供給流量、回収流量から流量と圧損の関係を調べた。回収通路と吹出し通路それぞれに関して、密度・

差圧平方根 ($2\rho\Delta P$)^{0.5} を定義し、これに対する回収・吹出し蒸気流量計測値/設計供給流量の関係が整理した。吹出し冷却通路の流量は前縁部と後縁部の吹出し通路の合計流量であり、更に出口部圧力は相対的に後縁部からの吹出し量が多い静翼試験では翼列出口主流静圧、前縁部からの吹出し量が多い動翼試験では翼列入口主流全圧で代表させた。一連の計測結果は、静翼・動翼共に設計値と良く一致しており、内部冷却通路設計の妥当性が確認された。

5. 結論

1700℃ 級水素燃焼タービンの初段静翼と初段動翼に適用可能なハイブリッド冷却翼を開発し、1700℃ 水素燃焼翼列評価試験にて冷却性能を確認した。(1)冷却蒸気流量変化(供給量、回収量、吹出し量)に対して、冷却効率の相対変化は予測値と良く一致することを確認した。(2)1700℃の定格温度試験においても、良好な冷却性能を示し、メタル温度分布は予測値と良く一致することを確認した。(3)回収および吹出し冷却通路内の冷却蒸気流量と圧損の特性は計画と良く一致することを確認した。

謝辞

本研究は、財団法人発電設備技術検査協会を通して、NEDOからの委託で実施した。両機関に対して研究へ

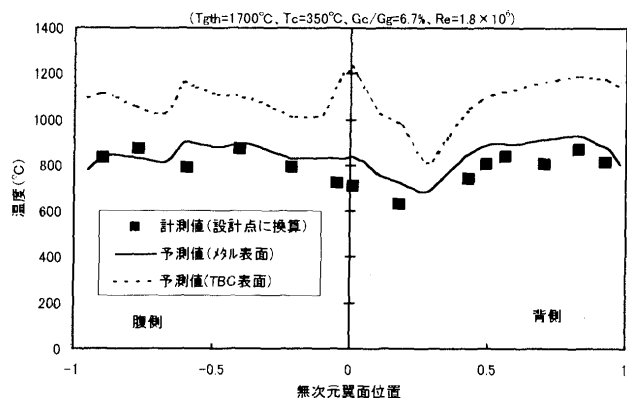


図11 静翼メタル温度分布(設計点)

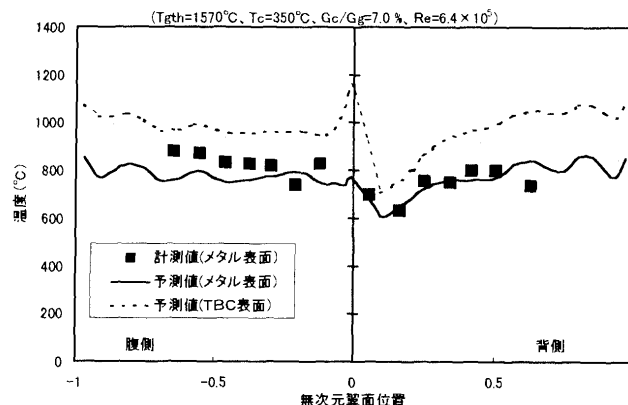


図12 動翼メタル温度分布(設計点)

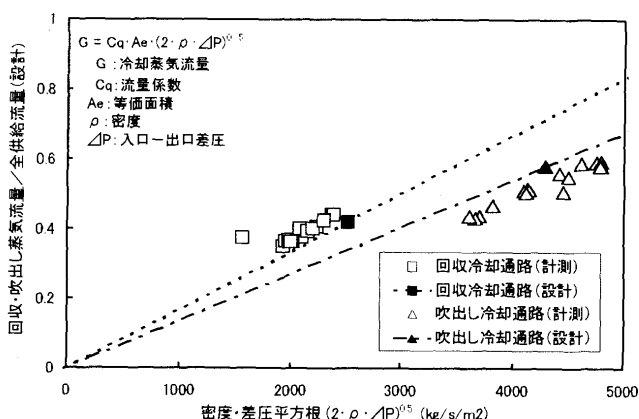


図13 静翼冷却蒸気流量特性

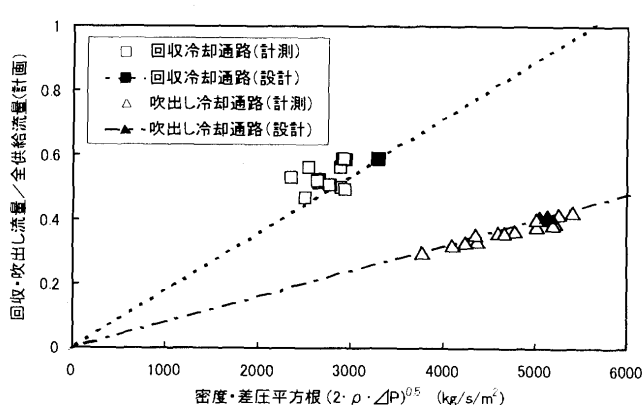


図14 動翼冷却蒸気流量特性

の支援に謝意を表します。

参考文献

- (1) Mouri, K., et al., "Research and Development of Hydrogen Combustion Turbine and Very Hot Heat Exchanger in WE-NET Project", IJPGC '98 Vol. 1 (1998), 433 - 437
- (2) 佐伯, 他 4 名, GTSJ 第 13 回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (1998), 201 - 206
- (3) Okamura, T., et al., "Heat Transfer in Cooling Channel Applied to Trailing Edge Region in Turbine Rotor Blade", IJPGC '99 Vol. 1 (1999)
- (4) Biswas, D., et al., "Calculation of Transitional Boundary Layer with an Improved Low Reynolds Number Version of the $k-\epsilon$ Turbulence Model", ASME paper 93-GT-73 (1993)

傾斜リブ付き正方形断面回転直管における乱流熱伝達の LES

Large Eddy Simulation of Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Square Duct with Angled Rib Turbulators

村田 章^{*1}
MURATA Akira

望月 貞成^{*2}
MOCHIZUKI Sadanari

キーワード：熱伝達，伝熱促進，乱流，差分法，ガスタービン，タービン翼冷却，ラージエディシミュレーション，コリオリ力，傾斜リブ

Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Turbulent Flow, Finite Difference Method, Gas Turbine, Blade Cooling, Large Eddy Simulation, Coriolis Force, Angled Rib Turbulator

Abstract

Heat transfer in a rotating rib-roughened duct was numerically simulated by using the second order finite difference method in coordinates fitted to angled ribs. In order to investigate the effect of the Coriolis force and the angled rib turbulators on the turbulence, the large eddy simulation was adopted with a Lagrangian dynamic subgrid-scale model. For the turbulent Reynolds number of 350, stationary and rotating conditions were computed for a rib angle of 60 deg, and the results were compared with the previous results of transverse 90 deg rib case. The present results clearly showed the locally high heat transfer coefficient at following locations: midpoint between ribs, in front of the rib on the rib-roughened walls, and around the rib on the side walls. The rotation induced the dissimilarity between the streamwise velocity and temperature, and the friction factor and overall Nusselt number were decreased by the rotation for 60 deg rib case which was opposite to the 90 deg rib case.

1. 緒言

地球環境保全，エネルギー有効利用のためにガスタービンの高効率化が求められているが，この高効率化に伴いタービン入口温度は高温化し，材料の高温強度を保つためにタービン動翼の高性能な冷却技術が重要となる。一般にタービン動翼の冷却には表面でのフィルム冷却と内部流路での強制対流冷却が用いられ，この強制対流冷却は回転場往復冷却流路での複雑な熱伝達現象となる⁽¹⁾。フィルム冷却は効果的な冷却方法だが，主流中への流体吹き出しによる翼の流体力学的効率低下，さらに主流温度低下による熱力学的効率低下を招く。そこで内部冷却性能のさらなる向上が望まれている。実機内部冷却流路では熱的負荷の大きな対向二壁面に乱流促進リブと呼ばれる突起物があり，流れの剥離・再付着，さらにはリブの傾斜により誘起される二次流れにより伝熱促進を行っている。これまで実験においては管軸に直交（90°リブ）および傾斜するリブ付き管についての多くの研究がなさ

れており⁽²⁾，熱電対による壁温計測^{(3)~(5)}，ナフタリン昇華法による物質伝達計測⁽⁶⁾⁽⁷⁾，さらに最近では感温液晶を用いた壁温計測^{(8)~(10)}によって詳細な局所熱伝達率分布が計測されている。数値解析においては90°⁽¹¹⁾および傾斜リブ付き管⁽¹²⁾⁽¹³⁾をReynolds平均による乱流モデル（ $k-\epsilon$ モデルやReynolds応力方程式モデル）を用いて解析が行われている。回転場においてはコリオリ力により二次流れと乱流成分の減衰・促進が誘起され，最低でもReynolds応力方程式を用いないと乱れ成分の非等方性によるコリオリ力の効果を再現できない⁽¹⁴⁾。また，リブの影響による剥離・再付着さらには回転コリオリ力が加わった複雑な非等方性乱流場の計算には，内部に経験パラメータを多く含むReynolds応力方程式モデルでは適用可能範囲に疑問が残る。そこで実際の乱流輸送過程を変動速度場から計算できる直接計算（DNS）⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾またはラージエディシミュレーション（LES）⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾が必要となるが，その適用例は静止場の平滑直管に関してさえ少ないのが現状である。剥離・再付着を伴う流れでは壁面の影響を表す減衰関数に含まれる内層スケールによる壁面距離が定義できないという問題もあり，LESのサブグリッドスケール（SGS）モデルにおいて減衰関数を用いる

原稿受付 1999年8月11日

*1 東京農工大学 大学院 生物システム応用科学研究科
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

*2 東京農工大学 工学部

Smagorinsky モデルでは不十分でありダイナミック SGS モデルを用いる必要がある⁽⁹⁾。

著者らはこれまで、熱電対での壁温計測による回転場および静止場での平滑・リブ付き管の局所熱伝達率計測^{(3)~(5)}、およびダイナミック SGS モデルを用いた LES による回転正方形⁽²⁰⁾・矩形⁽²¹⁾断面平滑直管、正方形・矩形断面 90° リブ付き直管^{(22)~(24)}の数値解析を行ってきた。そこでは、管路断面アスペクト比がコリオリ力による二次流れに与える影響、リブによる剥離・再付着および回転コリオリ力によって誘起される速度場と温度場の非相似性、リブ直前に見られる高熱伝達率領域が局所的な剥離泡の非定常的な運動により誘起されることなどが明らかになっている。

そこで本研究では、傾斜リブが流れと熱伝達に及ぼす影響について調べるために、回転場における傾斜リブ付き正方形断面直管内乱流熱伝達をダイナミック SGS モデルを用いた LES によって傾斜リブ適合格子での数値解析を行い、回転場での傾斜リブによる剥離・再付着、リブに沿う流れによる二次流れ、およびコリオリ力が伝熱促進をもたらすメカニズムについて、前報⁽²³⁾の 90° リブ付き管の結果との比較とともに詳細に調べた。

2. おもな記号

c_p	: 定圧比熱
C_s	: Smagorinsky 定数
D	: 流路正方形断面一辺長さ (= 等価直径)
e	: リブ高さ
f	: 摩擦係数 ($= \Delta p / (2\rho U_m^2)$)
h	: 熱伝達率
j	: Colburn の j 因子 ($= Nu_m / (Re_m Pr^{1/3})$)
J	: 座標変換ヤコビアン
l	: 長さスケール ($= 0.5D$)
L_ϕ	: 周方向位置
Nu	: Nusselt 数 ($= h D / \lambda$)
p	: 圧力
Δp	: 流れ方向長さ D に対する圧力損失
P	: リブピッチ ($= D$)
Pr	: Prandtl 数 ($= 0.71$)
Pr_{SGS}	: SGS 成分の Prandtl 数 ($= 0.5$)
$\dot{q}$	: 壁面熱流束
Re_m	: Reynolds 数 ($= U_m D / \nu$)
Re_τ	: Reynolds 数 ($= u_\tau l / \nu$)
Ro_m	: Rotation 数 ($= \omega D / U_m$)
Ro_τ	: Rotation 数 ($= \omega l / u_\tau$)
S_{ij}	: 歪み速度テンソル
t	: 時間
T	: 有次元温度
T_b	: 混合平均温度
T_r	: 摩擦温度 ($= \dot{q} / (\rho c_p u_\tau)$)
u, v, w	: x, y, z 方向速度

u_τ	: 平均摩擦速度
U^i	: 速度反変成分
U_m	: 管路平均流速
x, y, z	: 幅, 高さ, 主流方向座標
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	: x, y, z 方向の格子幅
α_{SGSj}	: SGS 成分熱流束
γ	: リブ取付け角度
λ	: 熱伝導率
ν	: 動粘度
ν_t	: SGS 渦粘度
ω	: 回転角速度
ρ	: 密度
θ	: 無次元温度 ($= (T - T_b) / T_r$)
τ_{SGSij}	: SGS 成分応力
τ_w	: 壁面せん断応力主流方向成分
ξ, η, ζ	: 一般座標系での各方向座標

添 字

B	: Blasius
L	: 局所値
m	: 管路平均値, 平均流速による定義
w	: 壁面
∞	: 完全発達領域
$*$	: 摩擦速度, 摩擦速度による定義
$+$	: 内層スケールによる無次元化
$-$	: 格子解像成分

3. 数値解析方法

図 1 に計算領域と座標系を示す。管路は高さ、幅ともに D の正方形断面 (等価直径 D) を有する。主流は半径方向外向きとし、この方向を z 方向とした。管路は管軸に垂直な回転軸まわりを角速度 ω で回転し、管路とともに回転する座標系で解析を行った。リブは Leading, Trailing 各面に管軸に対し角度 γ で取り付けられ、そのリブ軸に直交する断面は一辺長さ $0.1D$ の正方形であり、 z 方向ピッチは D である。本研究では浮力を無視し主流方向への周期性を仮定して、リブ間 1 ピッチを計算領域としリブ角度 $\gamma = 60^\circ$ について計算を行った。

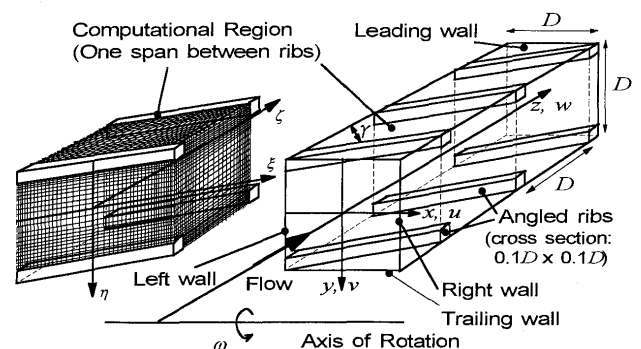


図 1 傾斜リブ付き回転管と傾斜リブ適合格子

このリブ高さ、ピッチは従来の研究⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾による最適値範囲内にある。また、リブ角度 60° は Han, et al.⁽²⁷⁾の結果から熱伝達率が最大となる角度として選んだ。

基礎式および解析方法は前報⁽²⁰⁾⁽²³⁾のものを一般曲線座標系へ変換したものである。非圧縮粘性流体の Navier-Stokes 方程式に格子幅のフィルタをかけ、長さスケール $l(=0.5D)$ および平均摩擦速度 u_* で無次元化すると、格子解像成分 $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ についての基礎方程式が物性値一定のもとで導ける⁽²⁷⁾。式(1)のように外力項 F_i には回転の影響としてコリオリ力を導入し、浮力は無視した。また、流れ方向への平均圧力勾配項 (値 2) を外力項に加えた。

$$F_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 2Ro_*\bar{w} \\ -2Ro_*\bar{v} + 2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

温度場については、 z 方向各位置における混合平均温度 T_b と摩擦温度 T_s を用いて $\theta = (T - T_b)/T_s$ と無次元化しエネルギー方程式を導いた。傾斜リブに適した格子で計算を行うために、 (x, y, z) 座標系における基礎式を (ξ, η, ζ) の一般曲線座標系へ変換した。傾斜直線リブには斜方格子で充分であるが、将来的な拡張を考えプログラムは一般曲線座標系用とした。梶島ら⁽²⁸⁾の勾配型による一般曲線座標系での基礎式は以下の通りである。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial J \bar{U}_j}{\partial \xi_j} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\bar{U}^j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \xi^j} - \frac{\partial \xi^j}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \xi^j} + \frac{1}{Re_*} \frac{\partial \xi^j}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \xi^k} \right) + \frac{\partial \xi^k}{\partial x_j} \frac{\partial \tau_{SGSij}}{\partial \xi^k} + F_i \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{U}^j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi^j} - \frac{\partial \bar{w}}{\partial \xi^j} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi^j} + \frac{1}{Re_* Pr} \frac{\partial \xi^j}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{\partial \xi^k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi^k} \right) + \frac{\partial \xi^k}{\partial x_j} \frac{\partial \alpha_{SGSj}}{\partial \xi^k} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\bar{U}^j$ は速度の反変成分であり、 $J = \partial(x, y, z) / \partial(\xi, \eta, \zeta)$, $(x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$, $(\xi^1, \xi^2, \xi^3) = (\xi, \eta, \zeta)$ である。

速度・温度場の基礎式に現れる SGS 成分 τ_{SGSij} , α_{SGSj} はそれぞれ下式で表される。

$$\tau_{SGSij} = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \dots\dots\dots(5)$$

$$\alpha_{SGSj} = \frac{\nu_t}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \xi^k}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi^k} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi^k}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \xi^k} + \frac{\partial \xi^k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \xi^k} \right) \dots\dots\dots(7)$$

$$\nu_t = C_s^2 (\Delta x \Delta y \Delta z)^{2/3} \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \dots\dots\dots(8)$$

前報⁽²³⁾⁻⁽²⁴⁾では Germano, et al.⁽²⁹⁾のダイナミック SGS 応力モデルを用い、Lilly⁽³⁰⁾の方法で C_s の値を位置の関数として計算した。 C_s の平均については幅方向の対称性と時間平均を用い、負の値を取り除いた。しかし、本研究で対象とする傾斜リブを有する流れ場は回転時には乱流統計量に対する幾何学的な対称性が無くなるので、

Meneveau, et al.⁽³¹⁾の Lagrangian Dynamic SGS モデルを用いた。これは、 C_s を流体塊の pathline に沿って平均する方法である。SGS の乱流 Prandtl 数 Pr_{SGS} は 0.5 一定とした⁽³²⁾。テストフィルタ幅は格子幅の 2 倍とし、空間フィルタは文献⁽³³⁾を参考にし四次精度とした。

基礎式はコロケート格子を用いたエネルギー保存性を満足する差分法⁽²⁸⁾により離散化した。空間および時間離散はそれぞれ粘性項を二次精度中心差分と Crank-Nicolson 法、対流項を保存特性を考慮した二次精度差分と二次精度 Adams-Bashforth 法とした。外力項にも二次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。圧力場には SMAC 法⁽³⁴⁾を用いそれぞれの連立一次方程式を SOR 法で解いた。計算領域は無次元で x, y, z 方向にそれぞれ $2 \times 2 \times 2$ となる。この計算領域は内層の長さスケール ν/u_* で無次元化すると $700 \times 700 \times 700$ となる (以下内層スケールでの無次元量を添字 + を付けて表す)。計算条件は Reynolds 数 $Re_*(=u_* l / \nu) = 350$ とし、Rotation 数 $Ro_*(\omega l / u_*) = 0, 1.0$ の二通りである。平均流速と等価直径で定義した Reynolds 数 Re_m は静止時に $90^\circ, 60^\circ$ リブ管でそれぞれ 4100, 3150 であった。本研究で用いた摩擦速度による Re_* , Ro_* と一般に実験結果の整理に用いられる平均流速による Re_m , Ro_m の値の対応を表 1 に示す。境界条件は壁面およびリブ表面で速度 0 および等熱流束 (但しリブ側面は断熱)、流路入口・出口では Patankar, et al.⁽³⁴⁾の方法による周期境界条件とした。壁面での中間速度、圧力の境界条件は文献^{(35), (36)}の方法を用いた。

計算格子は tanh 関数を用いて物理空間では壁面およびリブ表面近傍で格子が密となる不等間隔格子とした。格子点数は $47 \times 47 \times 47$ である。但し、リブ表面で境界条件を与えたのでリブ内部は解いていない。本研究で用いた格子間隔は $\Delta x^+ = 1.0 \sim 38$, $\Delta y^+ = 0.6 \sim 52$, $\Delta z^+ = 4.0 \sim 28$ となる。計算結果に格子依存性がないことは $65 \times 65 \times 65$ の格子での計算をいくつかの条件について行い確認した。時間刻みは $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ であり、 ν/u_*^2 で無次元化すると 0.035 となる。計算は近い条件の結果を初期条件とし、最低でも 120,000 ステップ計算し発達させた後に、400,000 ステップ (無次元時間 40, 内層スケールで 14,000) 計算し統計量を算出した。この 400,000

表 1 本研究で用いた無次元数 (Re_* , Ro_*) と平均流速定義の無次元数 (Re_m , Ro_m) の対応 (90° リブは村田・望月⁽²³⁾のデータ)

γ	90deg		60deg	
Re_*	350			
Ro_*	0	1.0	0	1.0
Re_m	4106	3959	3148	3645
Ro_m	0	0.354	0	0.384

ステップの計算に NEC SX 4 B で約 76 CPU 時間を要した。本研究では、静止時に統計平均量が十分な対称性を示すように差分精度を二次精度とし、計算ステップ数を増やして計算を行っている。差分精度の影響については前報²³⁾で検討し、結果を大きく歪めないことを確認している。

4. 計算結果および考察

4.1 傾斜リブによって誘起される流れ場の様子

図 2 に 90° リブの幅方向 2 ヶ所での y - z 断面内速度ベクトル図を示す。左右の図はそれぞれ静止 ($Ro_\infty = 0$)、回転 ($Ro_\infty = 1$) の場合の 400,000 ステップの時間平均値である。静止の場合には上下リブの後部に剥離域が対称に形成されており、幅方向位置の違いはリブ周りの流れには大きな影響を与えず、高さ方向中央部での速度分布に違いが見られる。回転するとコリオリ力による二次流れの影響で、幅方向中央部 (図 2(b)右) では Pressure 側となる Trailing 面 (図中上壁) 側に運動量が輸送されるために、Trailing 面側でリブを越える流れが強くなる。逆に側壁近傍 (図 2(a)右) では Trailing 面から Leading 面へ向かう流れに支配される。

図 3 に傾斜 60° リブの y - z 断面内時間平均速度ベクトル図を示す。傾斜リブに沿う二次流れのために、幅方向に対称性はないので幅方向 3 ヶ所での値を示す。静止の場合、リブを越える流れは Left 面側 (図 3(a)左) で強く再付着を起こすが、Right 面側 (図 3(c)左) では傾斜リブによって誘起された二次流れにより上下壁側から高さ方向中央部 ($y=0$) へ向かう流れに支配されている。回転すると (各図右) コリオリ力による二次流れの

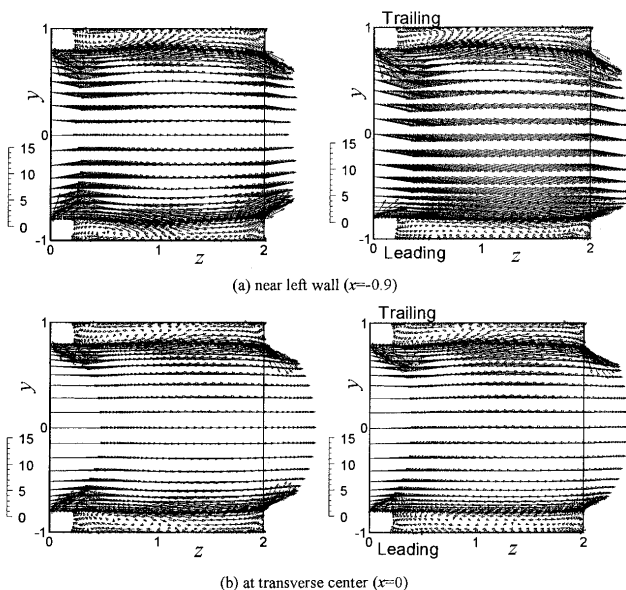


図 2 幅方向 2 ヶ所での y - z 断面内時間平均速度ベクトル図 (90° リブ管。各左右の図はそれぞれ $Ro_\infty = 0$, $Ro_\infty = 1$ の場合を表す。各図中のスケールは速度ベクトルの大きさを表す)

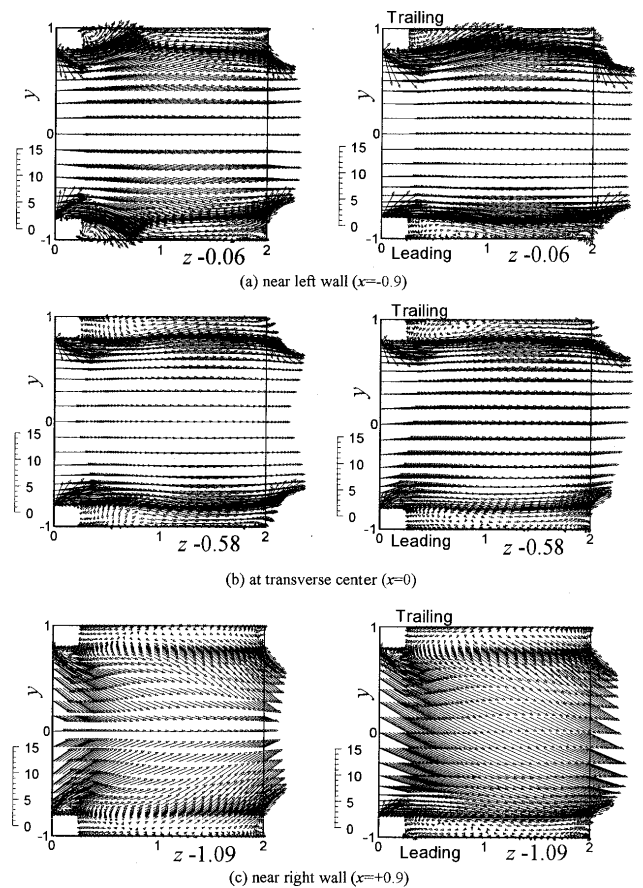


図 3 幅方向 3 ヶ所での y - z 断面内時間平均速度ベクトル図 (60° リブ管。他の説明は図 2 に同じ)

影響で、幅方向中央部 (図 3(b)右) では Pressure 側となる Trailing 面 (図中上壁) 側に流れが偏り、Right 面側 (図 3(c)右) では逆に Trailing 面から Leading 面へ向かう流れに支配される。しかし、Left 面側 (図 3(a)右) ではリブ周りの流れが強固に維持されている。

図 4 に傾斜 60° リブを含む ξ - η 断面内 (図 1 参照) の時間平均速度ベクトル ($\bar{u}$, $\bar{v}$) 図を示す。図では ξ - η 断面内の値を x - y 平面に投影して $\zeta(z)$ 方向 3 ヶ所での値を表示している。3 ヶ所の位置は、(a)リブを含む (リブ上中央) 位置、(b)リブ間中央位置、(c)リブ直前 (リブ幅の 0.5 倍手前) 位置である。静止の場合 (各図左) には上下壁近傍で傾斜リブに沿う流れ (図中左から右向き) が、高さ方向中央部では逆に図中右から左向きの流れが形成され、一対の渦によって流れ場が支配されている。回転時 (各図右) には平滑管や 90° リブの場合はコリオリ力による二次流れが幅方向中央部で流体を Leading 面側から Trailing 面側 (図中下から上) へ運ぶ二次流れを形成させる^{20)~24)}が、傾斜リブではこのコリオリ力の影響が傾斜リブによる流れと干渉し、図中中央部で右下から左上に向かって流れる傾いた二次流れを形成する。このため、Trailing 面 (図中上壁) では左から右に向かう流れが強く (図 4(b)(c)右)、この流れが Right 面 (図中右側の壁) 近傍を上から下に流れる。Leading 面 (図

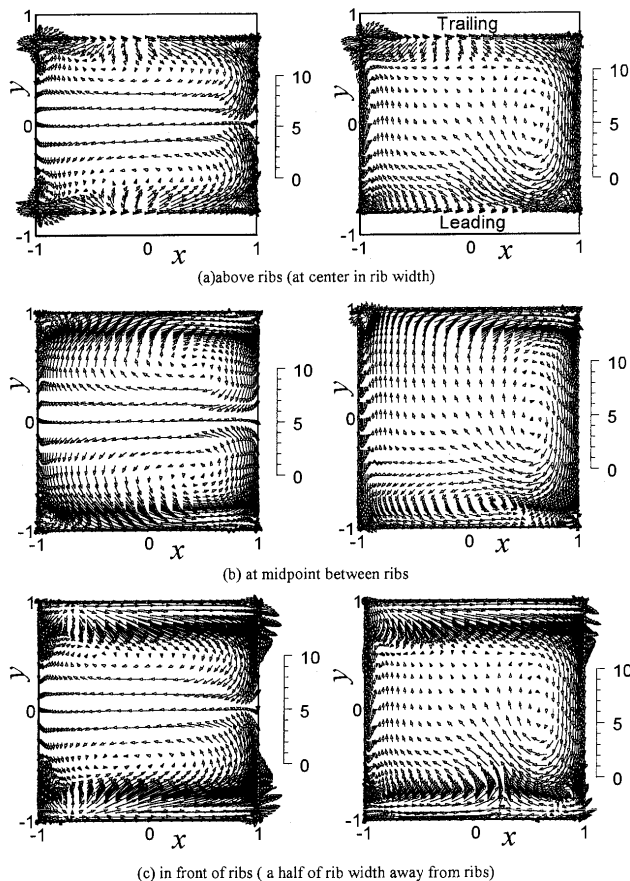


図4 流れ方向3ヶ所での ξ - η 断面内時間平均速度ベクトル($\bar{u}$, $\bar{v}$)図(60°リブ。各図は x - y 面に投影して表示。他の説明は図2に同じ)

中下壁)では傾斜リブに沿う流れとコリオリ力による流れが $x=0.2\sim 0.5$ 辺りで衝突している。Left面(図中左側の壁)極近傍でも上から下へ向かう流れが確認できる。

図5にリブ面に平行な x - z 断面内の時間平均速度ベクトル図を示す。図はリブ高さの半分の位置での値である。図5(a)の静止90°リブの場合には $z=1$ 辺りに速度ベクトルの向きが左右に分かれる再付着点がある。図5(b)の静止60°リブでは流れはLeft面側からRight面側に向って形成されており、速度が零となる領域はリブ間中央部では見られない。回転させた60°リブの場合(図5(c)(d))にもこの流れの様子は変化しないが、Suction側となるLeading面側(図5(c))よりもPressure側となるTrailing面側(図5(d))での速さ大きい。

図6に静止時における傾斜60°リブを含む ξ - η 断面内での時間平均主流方向速度 $\bar{w}$ (各図左)および温度 $\bar{\theta}$ (各図右)の等高線分布を示す。断面位置、表示方法は図4と同様である。リブを含む位置(図6(a))での $\bar{w}$ と $\bar{\theta}$ はほぼ相似な分布を示すが、リブ間中央位置(図6(b))で、 $\bar{\theta}$ に比べ $\bar{w}$ の上下壁近傍での y 方向勾配の絶対値が若干大きくなる。しかし、90°リブの場合²³⁾に比べるとリブ間中央およびリブ直前位置で $\bar{w}$ と $\bar{\theta}$ の相似性は比較的保たれている。また、Right面中央部($y=0$

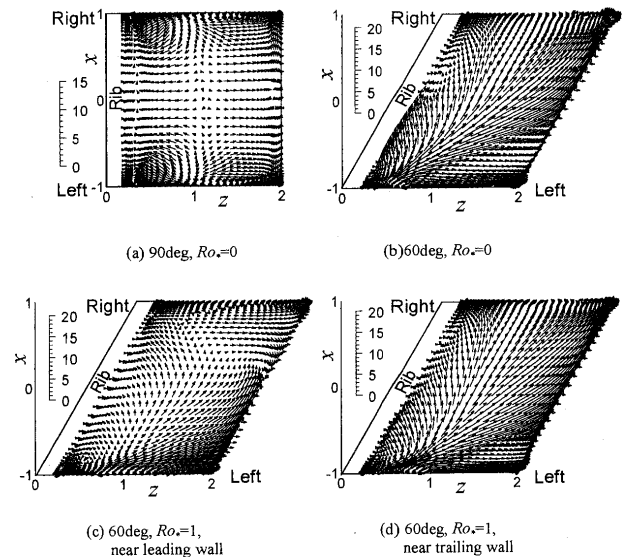


図5 x - z 断面内時間平均速度ベクトル図(断面はリブ面からリブ高さの0.5倍の位置)

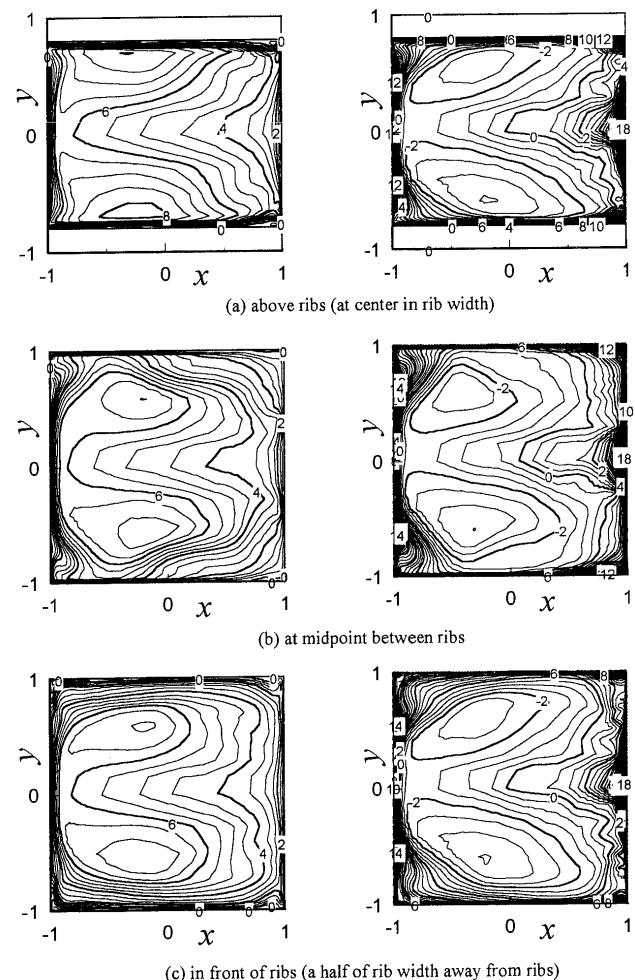
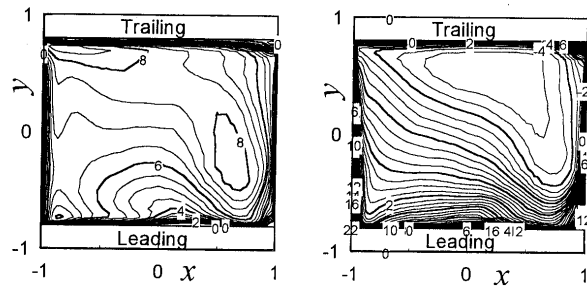
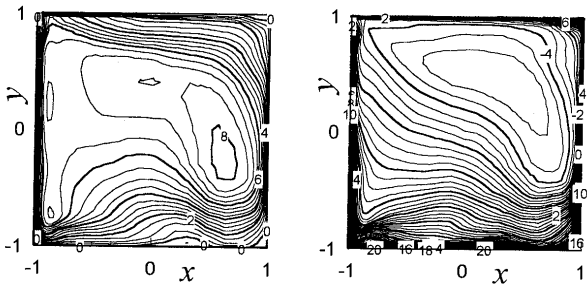


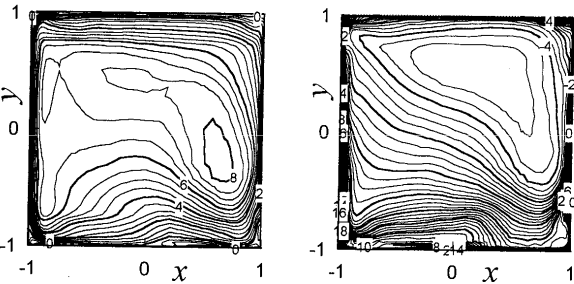
図6 流れ方向3ヶ所での ξ - η 断面内時間平均主流方向速度 $\bar{w}$ (左図)と温度 $\bar{\theta}$ (右図)(60°リブ, $Ro_\infty=0$ の場合。各図は x - y 面に投影して表示)



(a) above ribs (at center in rib width)



(b) at midpoint between ribs



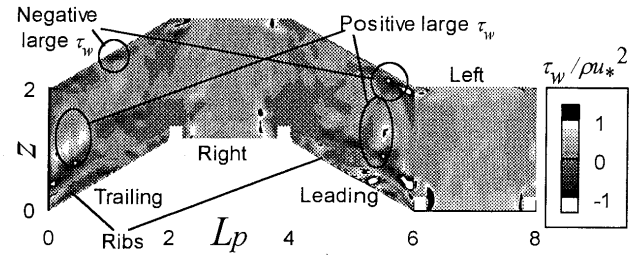
(c) in front of ribs (a half of rib width away from ribs)

図7 流れ方向3ヶ所での ξ - η 断面内時間平均主流方向速度 $\bar{w}$ (左図)と温度 $\bar{\theta}$ (右図) (60° リブ, $Ro_\infty=1$ の場合。各図は x - y 面に投影して表示)

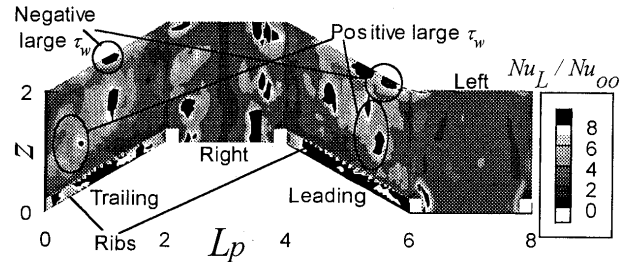
付近)では図4に見られた二次流れにより x 方向勾配の絶対値が $\bar{w}$, $\bar{\theta}$ ともに小さくなり、管軸側へ膨らんだ分布となる。図7の回転時には図4に見られた傾いた渦対の影響で速度、温度とも傾いた分布となる。 $\bar{w}$ と $\bar{\theta}$ の相似性はリブを含む断面(図7(a))においても崩れ、 $\bar{\theta}$ ではPressure側となるTrailing面(図中上壁)側かつRight面側にピークが偏るが、 $\bar{w}$ ではLeft面側でTrailing面側に、Right面側でSuction側となるLeading面(図中下壁)側に分かれてピークが存在する。リブ間中央位置、リブ直前位置では、Left-Trailing面側のピークは弱まり、Right-Leading面側のピークが残る。

4.2 壁面せん断応力主流方向成分分布と熱伝達率分布

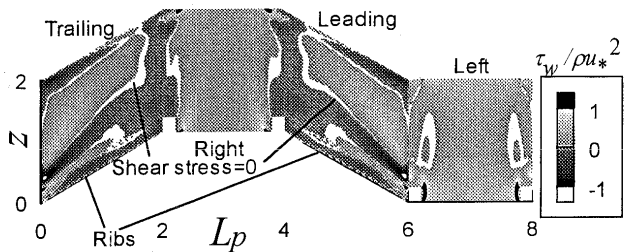
図8に静止 60° リブの四壁面上での壁面せん断応力主流方向成分((a)(c))およびNusselt数((b)(d))分布を示す。図で(a)(b)は瞬時値、(c)(d)は400,000ステップの時間平均値である。Nusselt数の値は下式の完全発達域直管内乱流熱伝達経験値(Kays and Crawford⁽⁹⁷⁾) Nu_∞ で規格化した。



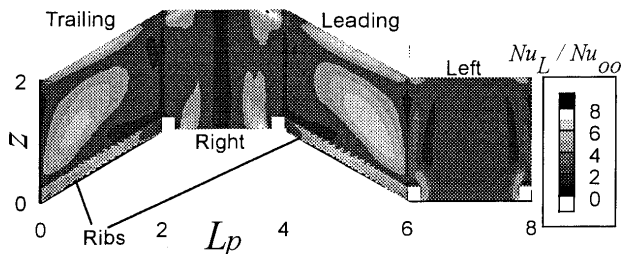
(a) instantaneous wall shear stress



(b) instantaneous Nusselt number



(c) time-averaged wall shear stress



(d) time-averaged Nusselt number

図8 壁面せん断応力主流方向成分と局所Nusselt数の四壁面上での分布 (60° リブ, $Ro_\infty=0$ の場合)

$$Nu_\infty = 0.022 Re_m^{0.8} Pr^{0.5} \dots \dots \dots (9)$$

図で上限・下限をスケールアウトした領域はそれぞれ黒・白で塗り潰して表示した。また、せん断応力が零の部分も白く塗り潰した。図中一部リブ周りにギザギザの分布が見えるが、これは表示ソフトの補間不具合であり実際のデータは滑らかに変化していることを付記しておく。図8(a)(b)の瞬時値同士を比較するとせん断応力の絶対値の大小とNusselt数の大小が高い相関を持っている。正の大きなせん断応力(例えば図中楕円部分)は壁面乱流におけるSweep motionに対応すると考えられ、熱伝達率上昇も理解しやすい。これに対し、負の大きなせん断応力(例えば図中円部分)はリブ直前上流側に見られ、

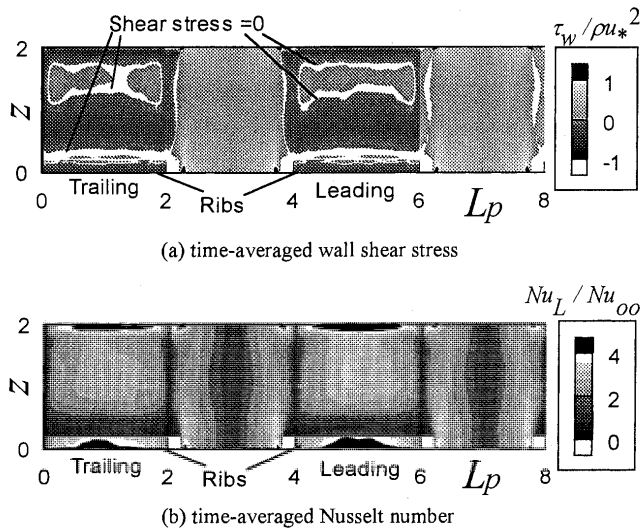


図9 壁面せん断応力主流方向成分と局所 Nusselt 数の四壁面上での分布 (90° リブ, $Ro_\infty=0$ の場合)

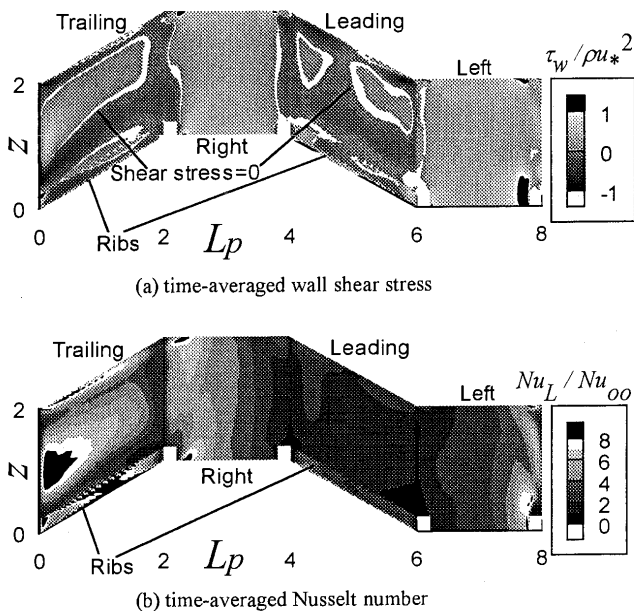


図10 壁面せん断応力主流方向成分と局所 Nusselt 数の四壁面上での分布 (60° リブ, $Ro_\infty=1$ の場合)

高い運動量を持った流体がリブ上流側側面に衝突し、向きを変えて壁面に衝突することにより生じる。この様子は 90° リブの場合⁽²³⁾と同じである。図 8(d)の時間平均 Nusselt 数をみるとリブ間の高 Nusselt 数領域は正のせん断応力領域 (図 8(c)) と対応し Left 面側に偏る。また、リブ直前では Nusselt 数は非常に高い値をとり、この領域も若干 Left 面側に偏る。この様な高 Nusselt 数領域は実験においても確認されている⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。特にリブ直前部は図 8(c)の時間平均場ではリブ直前の剥離泡としてしか見えないが、高運動量かつ低温度の流体が非定常的に作用することによって形成される高熱伝達領域である。これらの様子は Left 面側への偏り以外は、図 9 に示す 90° リブの場合と同様である。

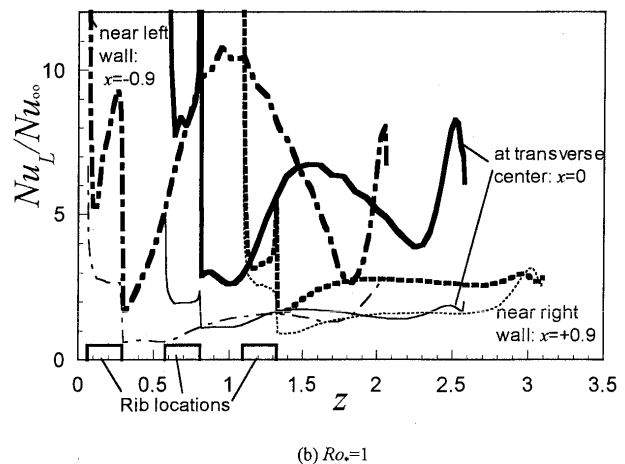
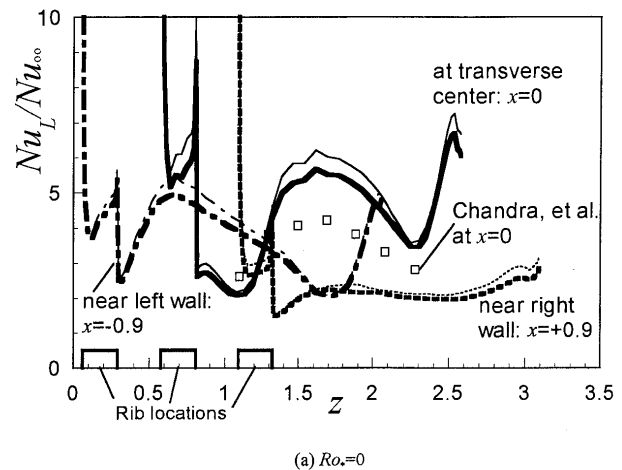


図11 リブ面幅方向 3ヶ所での局所 Nusselt 数分布 (60° リブ。太線, 細線はそれぞれ Trailing 面, Leading 面の値。記号の値は Chandra, et al.⁽⁶⁾による $Re_m=30,000$, $P/e=10$, $e/D=0.063$ のナフタリン昇華法の実験データ)

図 10 に回転時 ($Ro_\infty=1$) の壁面せん断応力主流方向成分および Nusselt 数の時間平均値分布を示す。せん断応力 (図 10(a)) の Trailing 面では静止時 (図 8(c)) と同様であるが、Leading 面では絶対値が小さくなっており、分布も異なる。Left 面においても Trailing 面側リブ周りで非常に高い値をとるが Leading 面側では流れが弱いためにリブ周りでの値の上昇が小さい。Nusselt 数 (図 10(b)) では Pressure 側である Trailing 面で値が大きく、Suction 側である Leading 面側で値が小さくなる。また、側壁 (Right, Left 面) では側壁近傍を Trailing 面側から Leading 面側に流れるコリオリ力による二次流れ (図 4 右) のために Leading 面側から Trailing 面側へ向って Nusselt 数が上昇する様子は 90° リブの場合⁽²³⁾と定性的に同じである。

図 11 に 60° リブの場合の幅方向 3ヶ所での z 方向 Nusselt 数分布を示す。図中太線と細線はそれぞれ Trailing 面と Leading 面を表す。前報⁽²⁴⁾で示した様に静止 90° リブ管の場合には、局所 Nusselt 数は Han, et al.⁽²⁸⁾の実験結果と良好な一致を示した。図 11(a)には比較のため

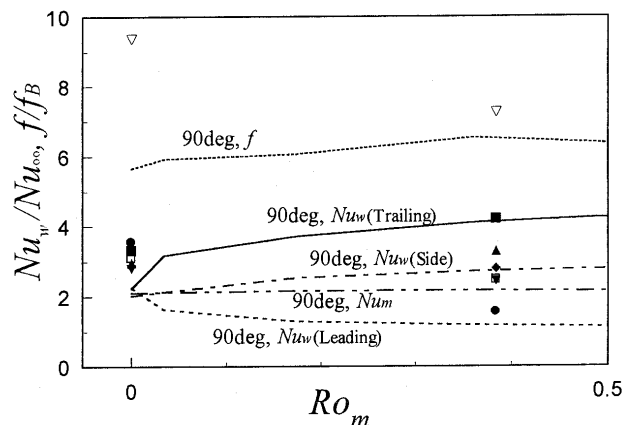


図12 回転と傾斜リブが壁面平均 Nusselt 数 Nu_w と摩擦係数 f に与える影響 (線と記号はそれぞれ 90° リブ⁽²⁾⁽²³⁾, 60° リブの場合を表す。各記号は, ■: Trailing 面, ●: Leading 面, ▼: Left 面, ▲: Right 面, □: 管路平均値 Nu_m , ▽: 摩擦係数 f)

に Chandra, et al.⁽⁶⁾ のナフタリン昇華法による実験結果 (60° リブ, $Re_m = 30,000$, $e/D = 0.063$, $P/e = 10$, 幅方向中央位置 ($x=0$)) をプロットした。静止時 (図 11(a)) に計算結果はリブ上面で非常に高い値をとり, その後一度減少しリブ間で極大値を取った後, 再度減少しリブ直前でもう一度極大値を取る。この様子は 90° リブの場合⁽²³⁾と同様である。本研究の計算条件は実験と比べリブ高さが高く, Reynolds 数が低い。このように条件が異なるために定量的に比較するのは困難であるが, 計算結果は実験結果よりも高い値となり, Reynolds 数が高い場合よりも低い場合にリブの熱伝達に与える影響がより大きい⁽⁶⁾ことを考えると計算値が実験値よりも高いのは妥当な結果と言える。幅方向位置の違いは, 傾斜リブによる二次流れの上流側となる $x = -0.9$ から中央位置 $x = 0$ に少し増加し, 下流側となる $x = +0.9$ では値が低下し, 分布も平坦となる。幅方向に二次流れの下流側で熱伝達率が低下する様子は実験⁽⁵⁾⁽⁶⁾でも報告されている。回転させた場合 (図 11(b)) には Pressure 側となる Trailing 面で全体的に値が上昇し, Suction 側となる Leading 面で非常に値が低くなる。図 8(d) と図 10(b) の比較から Trailing 面ではリブ間の高熱伝達領域は回転により Left 面側に近づくので, 図 11(b) でリブ間極大値は幅方向 $x = -0.9$ から $x = +0.9$ へ単調減少となる。

図12に平均流速で定義したRotation数 $Ro_m (= \omega D / U_m)$ と各壁面平均 Nusselt 数 Nu_w および摩擦係数 f の関係を示す。 Nu_w と f の値は式(9)の Nu_∞ および下式で与えられる Blasius 式の値 f_B でそれぞれ規格化した。

$$f_B = 0.079 Re_m^{-0.25} \dots\dots\dots (10)$$

図中記号によるプロットが本研究の 60° リブの結果を表し, 各線は比較のための前報⁽²⁾⁽²³⁾の 90° リブの結果を示す。傾斜 60° リブの場合では, 静止時に 90° リブと比べて Nusselt 数, 摩擦係数ともに大きくなるが, 特に摩

表2 回転およびリブ取付け角度による f と Nu_m の変化

	90deg rib		60deg rib	
	f/f_B	Nu_m/Nu_∞	f/f_B	Nu_m/Nu_∞
$Ro_m=0$	5.89	2.09	9.38	3.09
$Ro_m=1$	6.28	2.11	7.25	2.47
Change by rotation	+7%	+1%	-23%	-20%

擦係数の値が高い。回転によって 90° リブの場合には f 値は増加するが, 60° リブの場合には逆に減少する (-23%) のが特徴であり, 管路平均熱伝達率についても回転によって減少した (-20%)。流れに関して非対称な Right 面と Left 面の熱伝達率は静止時にはほぼ同じだが, 回転によって Right 面が Left 面より高い値となる。これは, Right 面側に低温部が偏り (図 7 右), Right 面上の広い領域での熱伝達率上昇 (図 10(b)) の結果である。この管路平均値の変化を表2にまとめた。傾斜リブによる二次流れの効果で, 静止時でも 90° リブに比べ 60° リブの値は大きく, 回転の影響は両者で増加・減少が逆になり, 回転による変化は 60° リブの方が大きい。

5. 結 論

傾斜 60° リブ管でも 90° リブ管の場合同様に, 壁面せん断応力主流方向成分の絶対値と熱伝達率の相関は高く, 特にリブ直前では負のせん断応力と高熱伝達率が瞬時値で高い相関を示し, 時間平均値でもリブ直前で非常に高い熱伝達率となる。 60° リブ管はリブ面近傍でリブに沿った二次流れを誘起し, 静止時に 90° リブ管に比べ熱伝達, 圧力損失ともに増加する。また, 60° リブ管の回転時には速度分布と温度分布に非相似性が現れ, 本計算条件範囲では 60° リブ管の場合, 90° リブ管とは逆に静止時に比べ管路平均熱伝達率, 摩擦係数ともに回転により減少した。

参考文献

- (1) 吉田豊明, ガスタービンの高温化と冷却技術, 日本ガスタービン学会調査研究委員会成果報告書 (1997), 1-4
- (2) 望月貞成・岡村隆成, 文献(1)と同じ, 48-63
- (3) Mochizuki, S., et al., Trans. ASME, J. of Turbomachinery, 119 (1997), 610-616
- (4) Mochizuki, S., et al., ASME Paper, 96-TA-6 (1996)
- (5) 村田章・他2名, 機論(b), 64-623 (1998), 2202-2207
- (6) Chandra, P.R., et al., Trans. ASME, J. of Turbomachinery, 110 (1988), 233-241
- (7) 廣田真史・他4名, 機論(b), 63-603 (1997), 1327-1335
- (8) Rau, G., et al., ASME Paper, 96-GT-541 (1996)
- (9) Baughn, J. W. and Yan, X., Enhanced Heat Transfer ASME, HTD-Vol. 202 (1992), 1-7
- (10) Ekkad, S. V. and Han, J. C., Int. J. Heat Mass Transf., 40-11 (1997), 2525-2537
- (11) Prakash, C. and Zerkle, R., Trans. ASME, J. of Turbomachin-

- ery, 117 (1995), 255–264
- (12) Stephens, M. A., et al., AIAA Paper, 95–2115 (1995)
- (13) Banhoff, B., et al., ASME Paper, 96–TA–7 (1996)
- (14) Launder, B. E., et al., J. Fluid Mech., 183 (1987), 63–75
- (15) Huser, A. and Biringen, S., J. Fluid Mech., 257 (1993), 65–95
- (16) Gavrilakis, S., J. Fluid Mech., 244 (1992), 101–129
- (17) Madabhushi, R. K. and Vanka, S. P., Phys. Fluids, A 3–11 (1991), 2734–2745
- (18) 梶島岳夫・他 2 名, 機論(b), 57–540 (1991), 2530–2537
- (19) 数値流体力学編集委員会編, 乱流解析, (1995), 79, 97, 東大出版会
- (20) 村田章・望月貞成, 機論(b), 64–623 (1998), 2196–2201
- (21) 村田章・望月貞成, 機論(b), 64–627 (1998), 3781–3787
- (22) Murata, A. and Mochizuki, S., Proc. of 11th International Heat Transf. Conf., Kyongju, Korea, 6 (1998), 565–570
- (23) 村田章・望月貞成, 機論(b), 64–628 (1998), 4129–4136
- (24) Murata, A. and Mochizuki, S., Int. J. Heat Mass Transf., 43–7 (2000), 1343–1259
- (25) Taslim, M. E. and Spring, S. D., J. of Thermophys. and Heat Transf., 8–3 (1994), 555–562
- (26) Korotky, G. J. and Taslim, M. E., ASME Paper, 96–GT–356 (1996)
- (27) Han, J. C., et al., Trans. ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 107 (1985), 628–635
- (28) 梶島岳夫・他 3 名, 機論(b), 63–614 (1997), 3247–3254
- (29) Germano, M., et al., Phys. Fluids, A 3–7 (1991), 1760–1765
- (30) Lilly, D. K., Phys. Fluids, A 4–3 (1992), 633–635
- (31) Meneveau, C., et al., J. Fluid Mech., 319 (1996), 353–385
- (32) Moin, P., et al., Phys. Fluids, A 3–11 (1991), 2746–2757
- (33) Amsden, A. A. and Harlow, F. H., J. of Comp. Phys., 6 (1970), 322–325
- (34) Patankar, S. V., et al., Trans. ASME, J. of Heat Transf., 99 (1977), 180–186
- (35) Kim, J. and Moin, P., J. Comp. Phys., 59 (1985), 308–323
- (36) Zang, Y., et al., J. Comp. Phys., 114 (1994), 18–33
- (37) Kays, W. M. and Crawford, M. E., Convective Heat and Mass Transfer, 3rd ed., (1993), 316, McGraw-Hill
- (38) Han, J. C., et al., Trans. ASME, J. of Heat Transf., 110 (1988), 91–98

傾斜リブ付き回転直管内乱流熱伝達における 管路断面アスペクト比の影響

Effect of Cross-Sectional Aspect Ratio on Turbulent Heat Transfer
in an Orthogonally Rotating Rectangular Duct with Angled Rib Turbulators

村田 章*¹
MURATA Akira

望月 貞成*²
MOCHIZUKI Sadanari

キーワード：熱伝達，伝熱促進，乱流，差分法，ガスタービン，タービン翼冷却，ラージエディシミュレーション，コリオリ力，傾斜リブ
Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Turbulent Flow, Finite Difference Method, Gas Turbine, Blade Cooling, Large Eddy Simulation, Coriolis Force, Angled Rib Turbulator

Abstract

Heat transfer in a rotating rectangular rib-roughened duct was numerically simulated by using the second order finite difference method. In order to investigate the effect of the Coriolis force and the cross-sectional aspect ratio on the turbulence, the large eddy simulation was adopted with a Lagrangian dynamic subgrid-scale model. The rotation number (0 and 1.0) and the cross-sectional aspect ratio (0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0) were varied for a turbulent Reynolds number of 350 and rib angle of 60 deg. The present results clearly showed the locally high heat transfer at the following locations: between ribs and in front of the rib on the rib-roughened walls; the locations were shifted to the left wall because of the flow induced by the angled rib. The dissimilarity between the streamwise velocity and temperature was observed for all the aspect ratio cases in the rotating case. The overall heat transfer and friction factors were decreased by the duct rotation.

1. 緒言

現在，地球環境保全・エネルギー有効利用を目指してガスタービンの高効率化が進められているが，この高効率化はタービン入口温度の高温化を招く。そこで材料の高温強度を考え，タービン動翼および静翼では表面でのフィルム冷却と内部流路での強制対流冷却が行われている。フィルム冷却は効果的な冷却方法だが，主流中への流体吹き出しによる翼の流体力学的効率低下，さらに主流温度低下による熱力学的効率低下を招く。そこで内部冷却性能のさらなる向上が望まれている。実機内部流路には熱的負荷の大きな対向二壁面に乱流促進リブと呼ばれる突起物があり，流れの剥離・再付着，さらにはリブの傾斜により誘起される二次流れにより伝熱促進を行っており，複雑な熱伝達現象に関する理解が必要となる⁽¹⁾。これまで実験では管軸に直交（90°リブ）および傾斜す

るリブ付き管について多くの研究がなされており⁽²⁾，熱電対による壁温計測^{(3)~(5)}，ナフタリン昇華法による物質伝達計測⁽⁶⁾⁽⁷⁾，さらに最近では感温液晶を用いた壁温計測^{(8)~(10)}によって詳細な局所熱伝達率分布が計測されている。数値解析においては90°⁽¹¹⁾および傾斜リブ付き管⁽¹²⁾⁽¹³⁾のReynolds平均による乱流モデルを用いた解析が行われている。回転場においてはコリオリ力により二次流れと乱流成分の減衰・促進が誘起され，最低でもReynolds応力方程式を用いないと乱れ成分の非等方性によるコリオリ力の効果を再現できない⁽¹⁴⁾。また，リブの影響による剥離・再付着さらには回転コリオリ力が加わった複雑な非等方性乱流場の計算には，内部に経験パラメータを多く含むReynolds応力方程式では適用可能範囲に疑問が残る。そこで実際の乱流輸送過程を変動速度場から計算できる直接計算（DNS）⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾またはラージエディシミュレーション（LES）⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾が必要となるが，その適用例は静止場の平滑直管に関してさえ少ないのが現状である。剥離・再付着を伴う流れでは壁面の影響を表す減衰関数に含まれる内層スケールによる壁面距離が定義できないと

原稿受付 1999年8月11日

* 1 東京農工大学 大学院 生物システム応用科学研究所
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

* 2 東京農工大学 工学部

いう問題もあり、LES のサブグリッドスケール (SGS) モデルにおいて減衰関数を用いる Smagorinsky モデルでは不十分でありダイナミック SGS モデルを用いる必要がある⁽¹⁹⁾。

著者らはこれまで、熱電対での壁温計測による回転場および静止場での平滑・リブ付き管の局所熱伝達率計測^{(3)~(5)}を行ってきた。また、数値解析ではダイナミック SGS モデルを用いた LES による回転正方形⁽²⁰⁾・矩形⁽²¹⁾断面平滑直管、正方形・矩形断面 90° リブ付き直管^{(22)~(24)}の計算を行い、管路断面アスペクト比によるコリオリ二次流れの違い、回転およびリブによる剥離・再付着に誘起される速度場と温度場の非相似性、リブ直前に見られる高熱伝達率領域が局所的な剥離泡の非定常的な運動により誘起されることなどが明らかになっている。また極最近では、傾斜リブ付き正方形断面直管⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾の数値解析を行い、傾斜リブが誘起する二次流れの様子や熱伝達率分布を LES により調べた。実際の動翼内部冷却流路では管路断面アスペクト比が 1.0 以外の場合が多いが、前報⁽²³⁾⁽²⁶⁾では傾斜リブ管におけるアスペクト比の影響を吟味するには至っていない。アスペクト比が変わると回転コリオリ力による二次流れが変化し⁽²¹⁾⁽²³⁾、さらに、リブ面の面積割合も変わるので傾斜リブによる二次流れも大きく変化することが予想される。

そこで本研究では、傾斜リブおよび流路の回転が流れと熱伝達に及ぼす影響が管路断面アスペクト比によってどのように変化するかを調べることを目的とした。回転場における傾斜リブ付き直管内乱流熱伝達を LES により傾斜リブ適合格子で数値解析し、傾斜リブによる剥離・再付着、リブに沿う流れによる二次流れ、そしてコリオリ力による二次流れがもたらす伝熱促進について管路断面アスペクト比を変化させて詳細に調べた。

2. おもな記号

A_R	: 管路断面アスペクト比 ($=H/W$)
c_p	: 定圧比熱
C_s	: Smagorinsky 定数
D	: 等価直径 ($=$ リブピッチ)
f	: 摩擦係数 ($=\Delta p/(2\rho U_m^2)$)
F_i	: 外力項
h	: 熱伝達率
H	: 管路高さ
j	: Colburn の j 因子 ($=Nu_m/(Re_m Pr^{1/3})$)
l	: 長さスケール ($=0.5D$)
L_p	: 周方向位置
Nu	: Nusselt 数 ($=hD/\lambda$)
Δp	: 流れ方向長さ D に対する圧力損失
Pr	: Prandtl 数 ($=0.71$)
Pr_{SGS}	: SGS 成分の Prandtl 数 ($=0.5$)
$\dot{q}$	: 壁面熱流束
Re_m	: Reynolds 数 ($=U_m D/\nu$)

Re	: Reynolds 数 ($=u_* l/\nu$)
Ro_m	: Rotation 数 ($=\omega D/U_m$)
Ro_*	: Rotation 数 ($=\omega l/u_*$)
S_{ij}	: 歪み速度テンソル
t	: 時間
T	: 有次元温度
T_b	: 混合平均温度
T_r	: 摩擦温度 ($=\dot{q}/(\rho c_p u_*)$)
u, v, w	: x, y, z 方向速度
u_*	: 平均摩擦速度
U_m	: 管路平均流速
W	: 管路幅
x, y, z	: 幅, 高さ, 主流方向座標
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	: x, y, z 方向の格子幅
α_{SGSj}	: SGS 成分熱流束
γ	: リブ取付け角度
λ	: 熱伝導率
ν	: 動粘度
ν_t	: SGS 渦粘度
ω	: 回転角速度
ρ	: 密度
θ	: 無次元温度 ($=(T-T_b)/T_r$)
τ_{SGSij}	: SGS 成分応力
τ_w	: 壁面せん断応力主流方向成分
ξ, η, ζ	: 一般座標系での各方向座標

添 字

B	: Blasius
L	: 局所値
m	: 管路平均値, 平均流速による定義
w	: 壁面
∞	: 完全発達領域
$*$	: 摩擦速度, 摩擦速度による定義
$+$	: 内層スケールによる無次元化
$-$	: 格子解像成分

3. 数値解析方法

図 1 に計算領域と座標系を示す。管路は高さ H , 幅 W の矩形断面 (等価直径 $D=2HW/(H+W)$) を有する。主流は半径方向外向きとし、この方向を z 方向とした。管路は管軸に垂直な回転軸まわりを角速度 ω で回転し、管路とともに回転する座標系で解析を行った。リブは Leading, Trailing 各面に管軸に対する角度 γ で取り付けられ、そのリブ軸に直交する断面は一辺長さ $0.1D$ の正方形で、 z 方向ピッチは D である。本研究では浮力を無視し主流方向への周期性を仮定してリブ間 1 ピッチを計算領域とした。等価直径を一定に保ってアスペクト比 $A_R (=H/W)$ を 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 の 5 通りに変化させてリブ角度 $\gamma=60^\circ$ の場合の計算を行った。このリブ高さ、ピッチは従来の研究⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾による

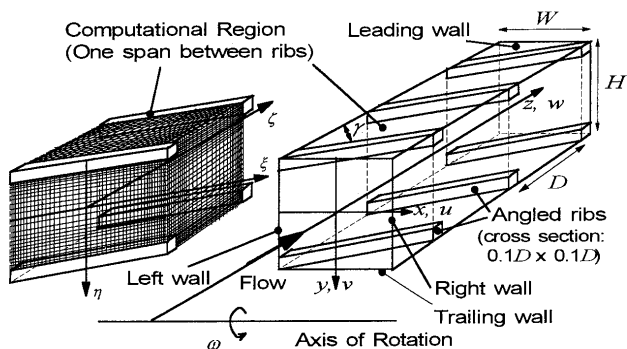


図1 傾斜リブ付き回転管と傾斜リブ適合格子

最適値範囲内にある。また、リブ角度 60° は Han, et al.^[29] の結果から熱伝達率が最大となる角度として選んだ。

基礎式および解析方法は前報^[23,26]と同じであるのでここでは簡単に説明する。非圧縮粘性流体の Navier-Stokes 方程式に格子幅のフィルタをかけ、長さスケール $l (=0.5D)$ および平均摩擦速度 u_τ で無次元化すると、格子解像成分 $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ についての基礎方程式が物性値一定のもとで導ける^[17]。式(1)のように外力項 F_i には回転の影響としてコリオリ力を導入し、浮力は無視した。また、流れ方向への平均圧力勾配項 (値2) を外力項に加えた。

$$F_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 2Ro_\tau \bar{w} \\ -2Ro_\tau \bar{v} + 2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

温度場については、 z 方向各位置における混合平均温度 T_b と摩擦温度 T_τ を用いて $\theta = (T - T_b)/T_\tau$ と無次元化しエネルギー方程式を導いた。傾斜リブに適合した格子を用いて計算を行うために、 (x, y, z) 座標系における基礎式を (ξ, η, ζ) の一般曲線座標系へ変換し、梶島ら^[30]の勾配型による一般曲線座標系での基礎式を用いた。

速度・温度場の基礎式に現れる SGS 成分 τ_{SGSij} , α_{SGSj} はそれぞれ下式で表される。

$$\tau_{SGSij} = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha_{SGSj} = \frac{\nu_t}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \xi^k}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi^k} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi^k}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \xi^k} + \frac{\partial \xi^k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \xi^k} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\nu_t = C_s^2 (\Delta x \Delta y \Delta z)^{2/3} \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \dots\dots\dots (5)$$

90° リブを扱った前報^{[23]~[24]}では Germano, et al.^[31]のダイナミック SGS 応力モデルを用い、Lilly^[32]の方法で C_s の値を位置の関数として計算し、 C_s の平均については幅方向の対称性と時間平均を用いて負の値を取り除いた。しかし、本研究で対象とする傾斜リブを有する流れ場は乱流統計量に対する幾何学的な対称性が回転時には無いので、Meneveau, et al.^[33]の Lagrangian Dynamic SGS モデルを用いた。これは、 C_s を流体塊の pathline に沿っ

表1 本研究で用いた無次元数 (Re_τ , Ro_τ) と平均流速定義の無次元数 (Re_m , Ro_m) の対応 (Re_τ は一定値 350。 90° リブは村田・望月^[28]のデータ)

	A_R	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0
	γ	60°	60°	60° (90°)	60° (90°)	60° (90°)
$Ro_\tau=0$	Re_m	2705	2763	3148 (4106)	4199 (5766)	6605 (9231)
	Ro_m	0				
$Ro_\tau=1$	Re_m	2792	3008	3645 (3959)	4822 (5264)	6811 (7215)
	Ro_m	0.501	0.465	0.384 (0.354)	0.290 (0.266)	0.206 (0.194)

て平均する方法である。SGS の乱流 Prandtl 数 Pr_{SGS} は 0.5 一定とした^[34]。テストフィルタ幅は格子幅の2倍とし、空間フィルタは文献^[35]を参考にし四次精度とした。

基礎式はコロケート格子を用いたエネルギー保存性を満足する差分法^[36]により離散化した。空間および時間離散はそれぞれ粘性項を二次精度中心差分と Crank-Nicolson 法、対流項を保存特性を考慮した二次精度差分と二次精度 Adams-Bashforth 法とした。外力項にも二次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。圧力場には SMAC 法^[35]を用いそれぞれの連立一次方程式を SOR 法で解いた。計算領域はアスペクト比 $A_R = 1.0, 2.0, 4.0$ の場合に無次元で x, y, z 方向にそれぞれ $2 \times 2 \times 2, 1.5 \times 3 \times 2, 1.25 \times 5 \times 2$ となる。この計算領域は内層の長さスケール ν/u_τ で無次元化すると $A_R = 1.0$ の場合に $700 \times 700 \times 700$ となる (以下内層スケールでの無次元量を添字+を付けて表す)。計算条件は Reynolds 数 $Re_\tau (=u_\tau l/\nu) = 350$ とし、Rotation 数 $Ro_\tau (= \omega l/u_\tau) = 0, 1.0$ の二通りである。本研究で用いた摩擦速度と等価直径の0.5倍で定義した無次元数 (Re_τ , Ro_τ) と平均流速と等価直径で定義した (Re_m , Ro_m) との対応を表1に示す。境界条件は壁面およびリブ表面で速度0および等熱流束 (但しリブ側面は断熱)、流路入口・出口では Patankar, et al.^[36]の方法による周期境界条件とした。壁面での中間速度、圧力の境界条件は文献^[37], ^[38]の方法を用いた。

計算格子は tanh 関数を用いて物理空間では壁面およびリブ表面近傍で格子が密となる不等間隔格子とした。格子点数は $47 \times 47 \times 47$ である。但し、リブ表面で境界条件を与えたのでリブ内部は解いていない。本研究で用いた格子間隔は $A_R = 1.0$ で $\Delta x^+ = 1.0 \sim 38$, $\Delta y^+ = 0.6 \sim 52$, $\Delta z^+ = 4.0 \sim 28$ となる。計算結果に格子依存性がないことは $65 \times 65 \times 65$ の格子での計算をいくつかの条件について行い確認した。差分精度の影響については前報^[23]と比較し、結果を大きく歪めないことを確認している。また前報^[39]と同じ静止場平滑管の場合の計算も行い、平均速度、乱れ強度、および第二種二次流れ強度において過去の DNS の結果と前報^[39]同様の一致をみた。時間刻みは $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ であり、 ν/u_τ^2 で無次元化すると 0.035 となる。計算は近い条件の結果を初期条件とし

($Ro_\infty = 0$ の場合の初期条件には異なるアスペクト比の計算結果を用いた), 最低でも 160,000 ステップ計算し発達させた後に, 80,000 ステップ (無次元時間 8, 内層スケールで 2,800) 計算し統計量を算出した。この 80,000 ステップの計算に NEC SX 4 B で約 15 CPU 時間を要した。但し, $A_R = 1.0$ については, 前報⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾の 400,000 ステップのデータを用いた。本研究では, 計算ステップ数を減らして計算を行い, より多くのアスペクト比での様子を調べた。

4. 計算結果および考察

図 2 から図 4 に静止場での傾斜 60° リブを含む (およびそれに平行な) $\xi-\eta$ 断面内 (図 1 参照) の時間平均速度ベクトル ($\bar{u}, \bar{v}$) 図 (図 2) と主流方向速度 $\bar{w}$ (図 3) および温度 $\bar{\theta}$ (図 4) の等高線分布を示す。図では $\xi-\eta$ 断面内の値を $x-y$ 平面に投影して $\zeta(z)$ 方向 3ヶ所での値を表示している。3ヶ所の位置は, 各アスペクト比で左から右 (または, 上から下) に, リブを含む (リブ上中央) 位置, リブ間中央位置, リブ直前位置 (リブ

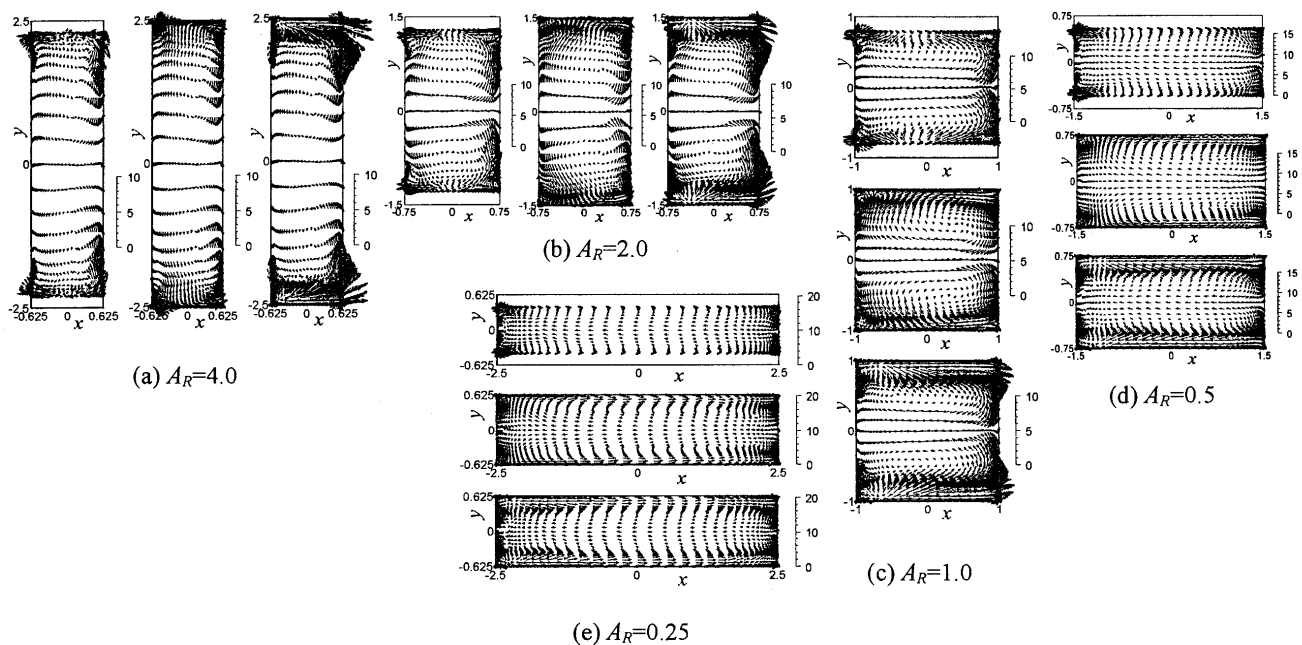


図 2 流れ方向 3ヶ所での $\xi-\eta$ 断面内時間平均速度ベクトル図 (60° リブ, $Ro_\infty = 0$ の場合。各図は $x-y$ 面に投影して表示。各アスペクト比で左, 中央, 右 (または, 上, 中央, 下) の各図は, リブ上中央, リブ間中央, リブ直前 (リブ幅の 0.5 倍手前) の各位置での値)

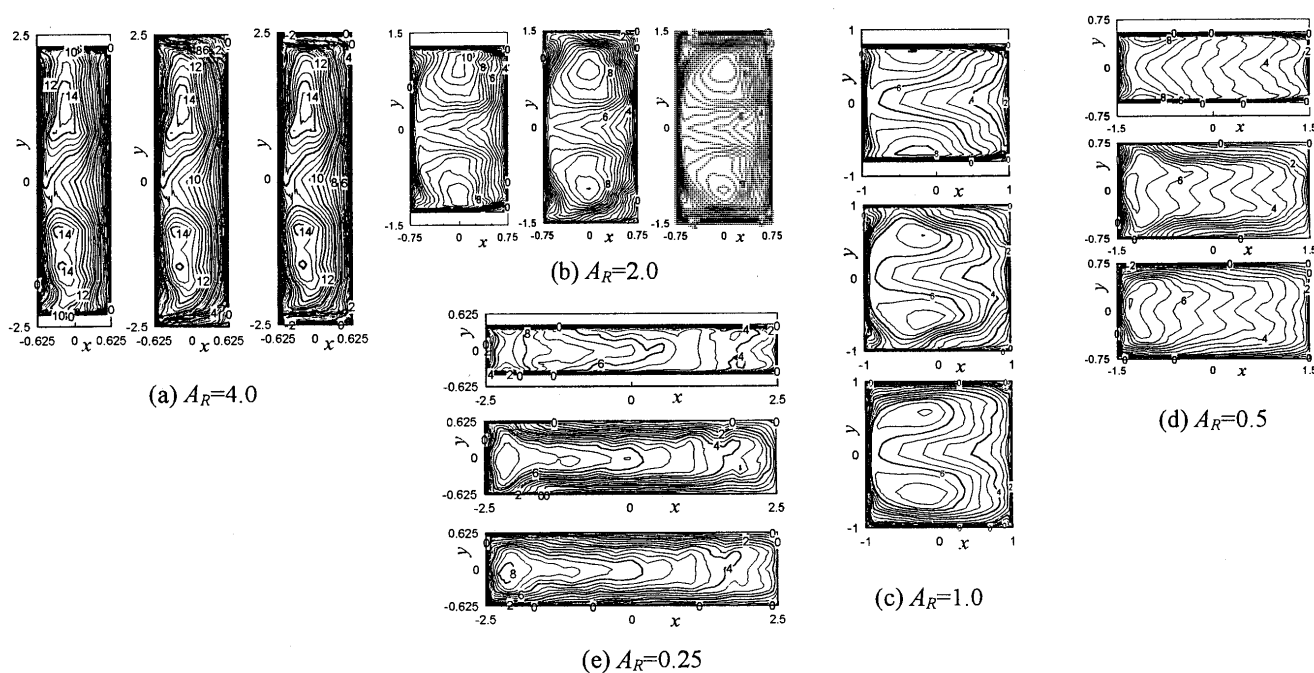


図 3 流れ方向 3ヶ所での $\xi-\eta$ 断面内時間平均主流方向速度 $\bar{w}$ 分布 (60° リブ, $Ro_\infty = 0$ の場合。他の説明は図 2 に同じ)

幅の0.5倍上流側)である。静止の場合、図2の上下壁近傍で傾斜リブに沿う流れ(図中左から右向き)が、また、高さ方向中央部では逆に図中右から左向きの流れが形成される。この一対の渦によって流れ場が支配される様子は各アスペクト比に共通である。

図3, 図4で、アスペクト比 $A_R \geq 1$ (図(a)-(c))では各断面での $\bar{w}$ と $\bar{\theta}$ はほぼ似た分布を示すが、 $A_R < 1$ の場合(図(d)(e))には $\bar{w}$ と $\bar{\theta}$ の相似は崩れている。また、傾斜リブによる二次流れによって二つに分かれたピークも $A_R = 0.5$ の $\bar{w}$ (図3(d)) および $A_R = 0.25$ の場合(図3(e), 図4(e))には見られない。Right面(図中

右側の壁)高さ方向中央部($y=0$ 付近)では図2に見られた二次流れにより x 方向への勾配(絶対値)が $\bar{w}$, $\bar{\theta}$ とともに小さくなる(膨らんだ分布となる)が、 $A_R < 1$ ではこの x 方向勾配は $\bar{\theta}$ に比べ $\bar{w}$ で変化が小さい。 $A_R = 0.25$ の $\bar{w}$ (図3(e))では傾斜リブによる二次流れは高さ方向に狭い管路形状のためにリブ面近傍で幅方向に一様な分布をもたらす。

図5の回転時($Ro_\tau = 1$)に、 $0.5 \leq A_R \leq 2.0$ (図5(b)-(d))では、コリオリ力による流れが傾斜リブによる流れと干渉し、図中右下隅部から左上に向う二次流れにより傾いた渦対を形成する。このため Trailing面(図中

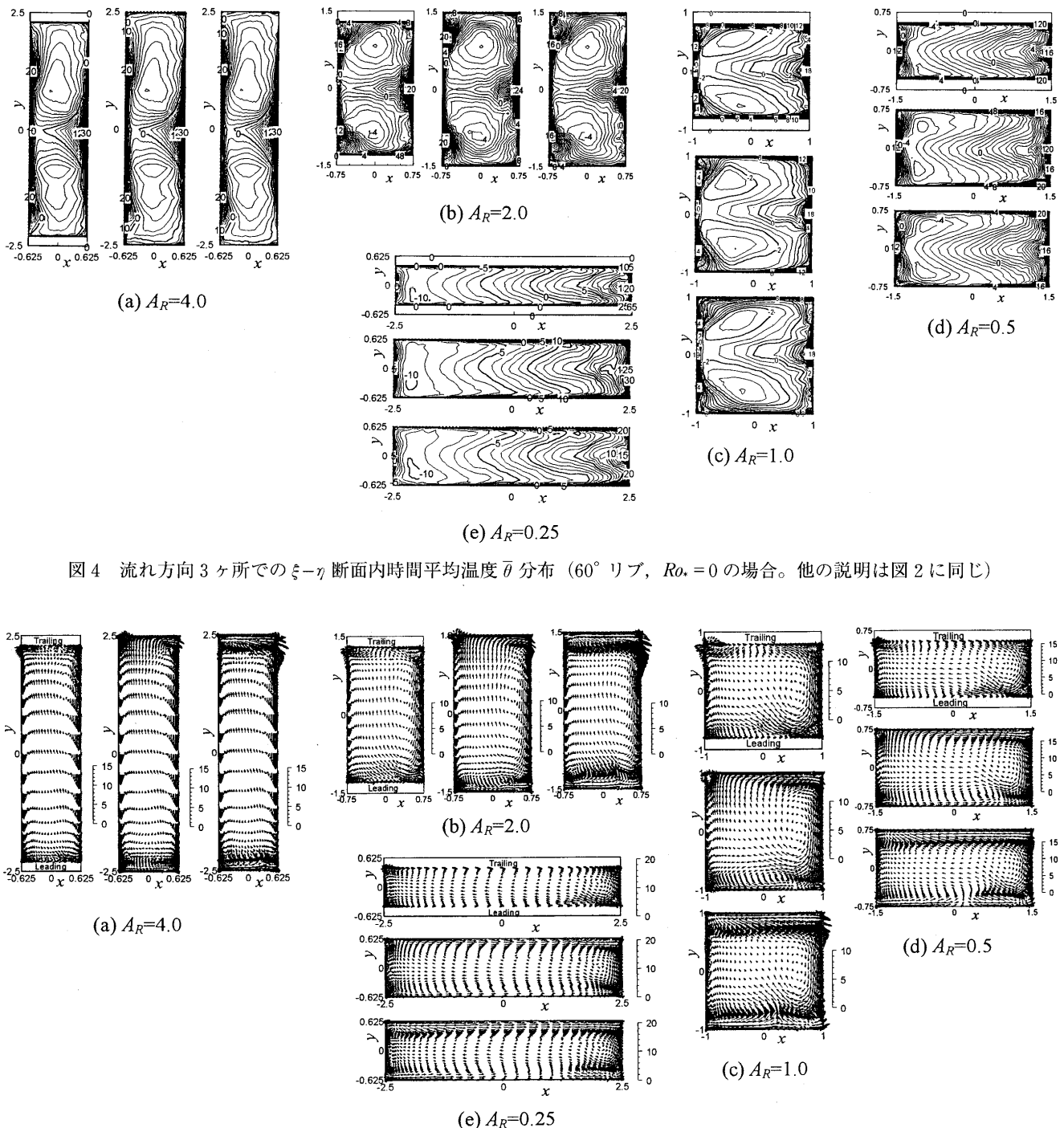


図4 流れ方向3ヶ所での ξ - η 断面内時間平均温度 $\bar{\theta}$ 分布 (60° リブ, $Ro_\tau = 0$ の場合。他の説明は図2に同じ)

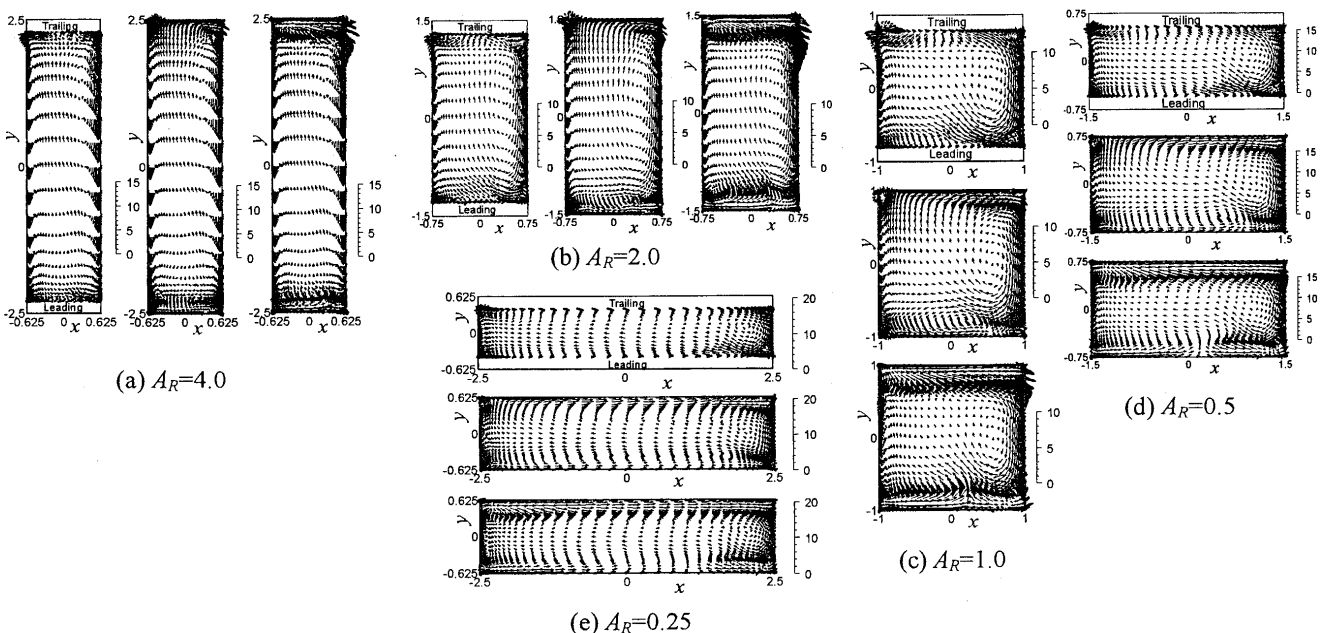


図5 流れ方向3ヶ所での ξ - η 断面内時間平均速度ベクトル図 (60° リブ, $Ro_\tau = 1$ の場合。他の説明は図2に同じ)

上壁)では左から右に向かう流れが強く、この流れが Right 面上を上から下に流れる。リブ直前位置では、Leading 面 (図中下壁) 側で傾斜リブに沿う流れ (図中左から右) とコリオリ力による流れ (図中右から左) が衝突している。Left 面では壁面極近傍で上から下へ向かう流れが確認できる。 $A_R=4.0$ (図 5(a)) では、右下隅部から左上に向う二次流れは非常に弱く、また、 $A_R=0.25$ (図 5(e)) では、この二次流れが Right 面側に局在化する。

図 5 に見られた傾いた渦対の影響で速度、温度とも傾いた分布 (図 6, 図 7) となり、 $\bar{w}$ と $\bar{\theta}$ の相似性は全て

の断面において崩れる。 $A_R=0.25$ を除き、リブを含む断面で $\bar{\theta}$ (図 7) は Pressure 側となる Trailing 面 (図中上壁) 側かつ Right 面寄りにピークが偏るが、 $\bar{w}$ (図 6) ではピークが二つに分かれ、Right 面側では Suction 側となる Leading 面 (図中下壁) 側に、Left 面側では Trailing 面側にそれぞれ偏る。他の二断面では $A_R \geq 1.0$ で図中 $\bar{w}$ の右下のピークのみが残る。コリオリ力による二次流れは流路幅方向への主流速度分布が大きい (A_R が大きい) ほど顕著となり⁽²⁾、傾斜リブによる二次流れはリブ面の幅方向長さが大きい (A_R が小さい) ほど顕著になるので、 A_R が大きい時にはコリオリ力による二

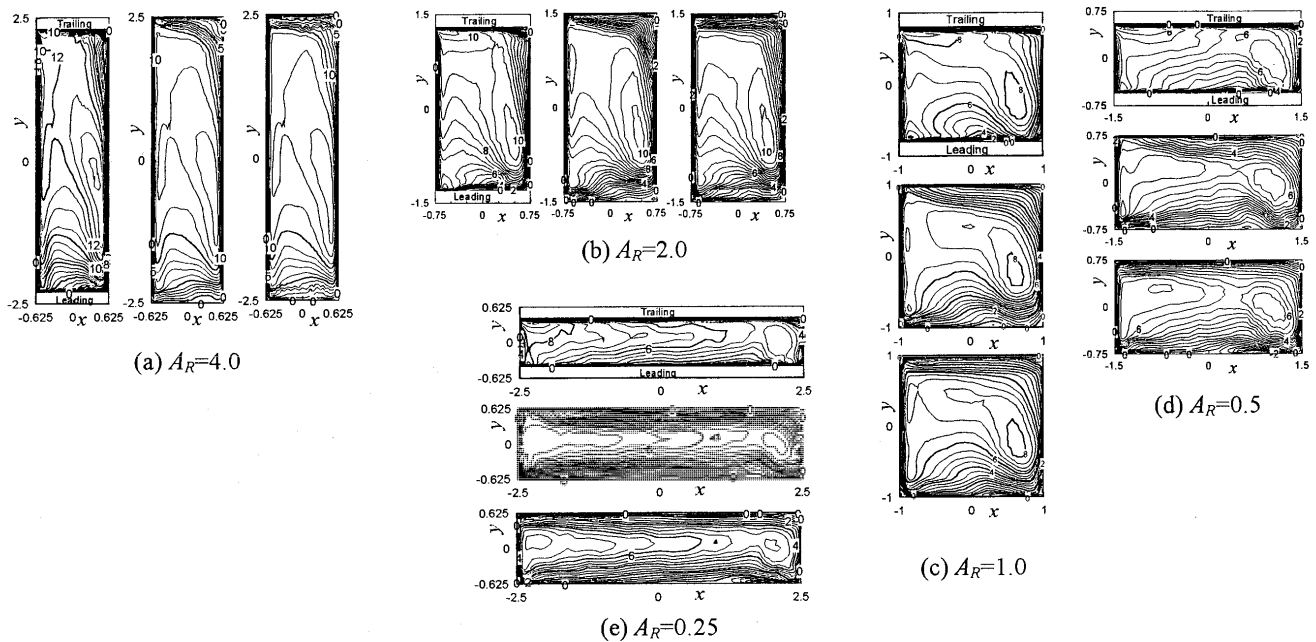


図 6 流れ方向 3 ケ所での ξ - η 断面内時間平均主流方向速度 $\bar{w}$ 分布 (60° リブ, $Ro_\tau=1$ の場合。他の説明は図 2 に同じ)

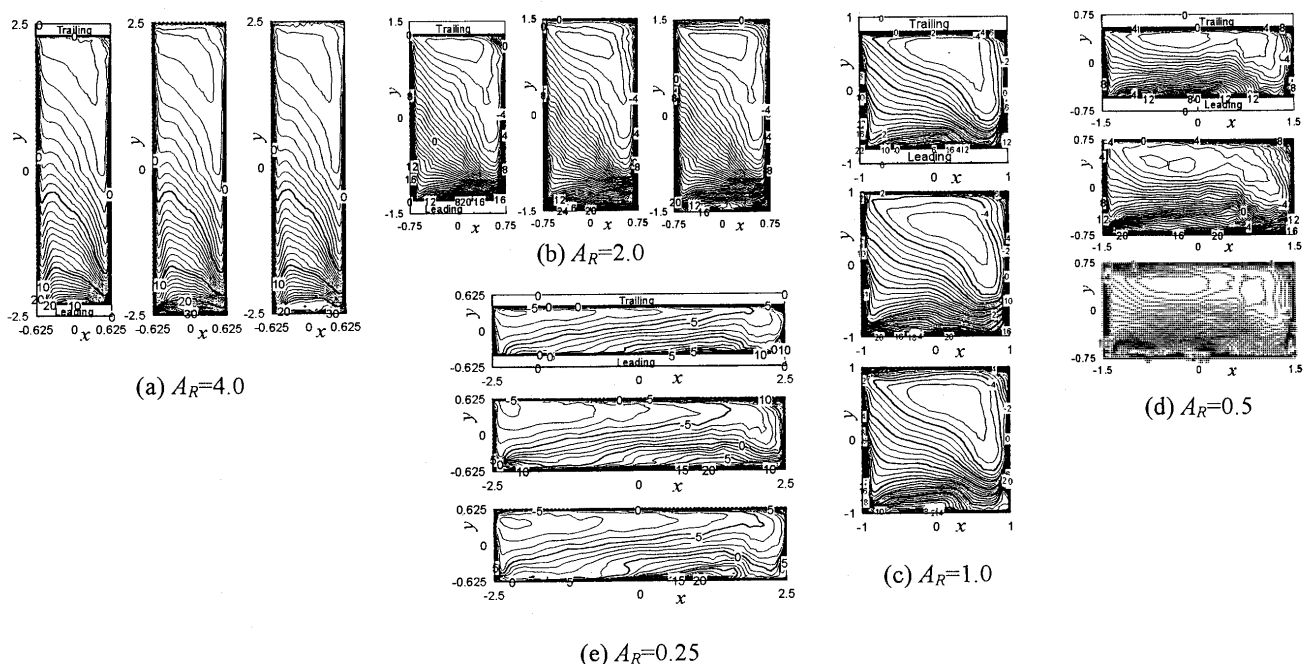


図 7 流れ方向 3 ケ所での ξ - η 断面内時間平均温度 $\bar{\theta}$ 分布 (60° リブ, $Ro_\tau=1$ の場合。他の説明は図 2 に同じ)

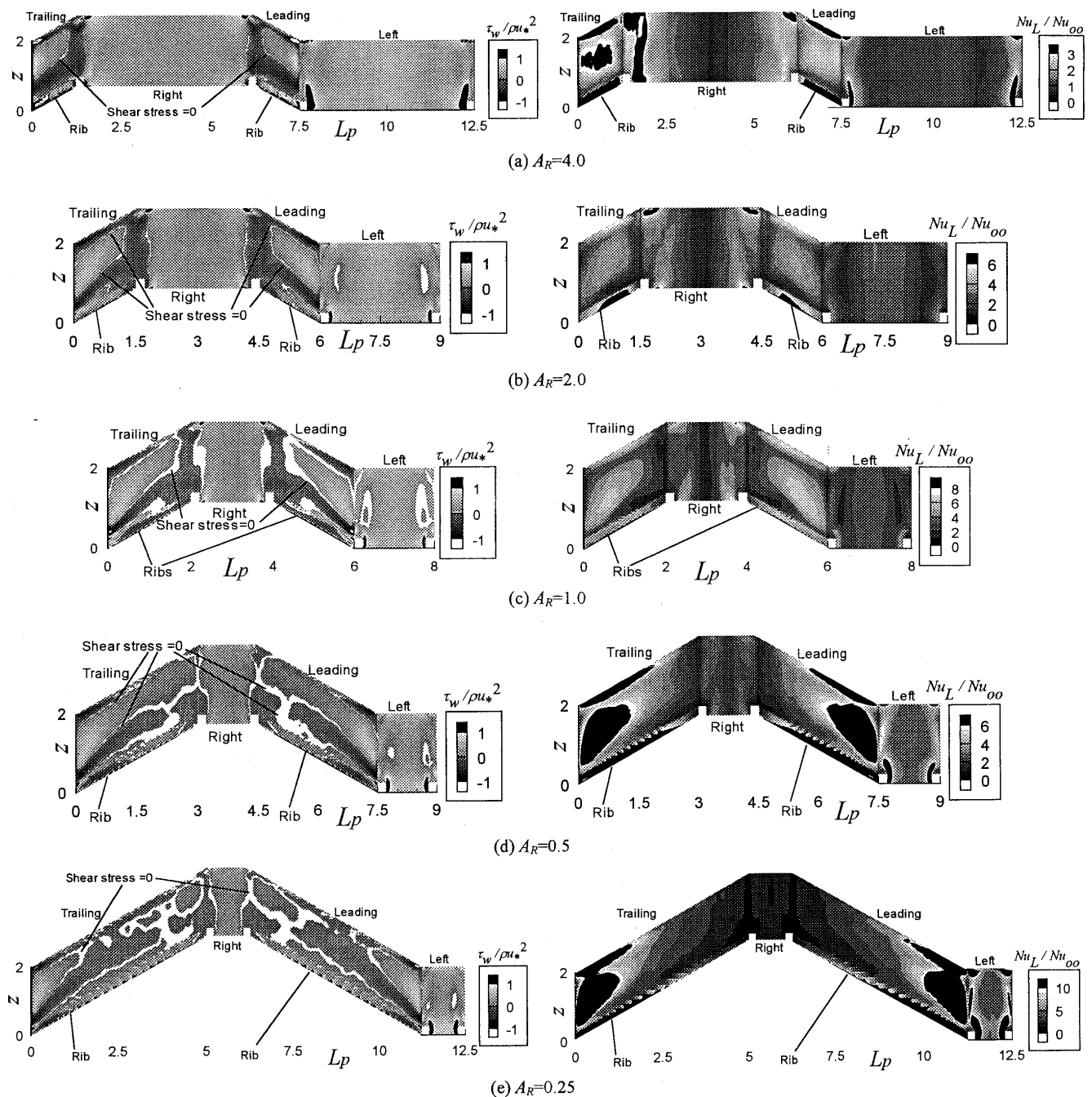


図8 時間平均壁面せん断応力主流方向成分（左）と局所 Nusselt 数（右）の四壁面上での分布（60° リブ, $Ro_* = 0$ の場合）

次流れが支配的に、 A_R が小さい時には傾斜リブによる二次流れが支配的になると考えられる。また、 A_R が非常に小さくなると（ $A_R = 0.25$ ；図6(e)）リブ面近傍では幅方向への流速変化が小さくなり（幅方向へ一様化し）、図3(e)と図6(e)の比較から回転による変化が小さいことがわかる。また、この時、 $\bar{w}$ 、 $\bar{\theta}$ ともLeft面側にピークが出るが、 $A_R = 0.25$ 以外の場合には回転によりRight面側にピークが出る。

図8に静止場における四壁面上での時間平均壁面せん断応力主流方向成分（各図左）およびNusselt数（各図右）分布を示す。Nusselt数の値は下式の完全発達域直円管内乱流熱伝達経験値（Kays and Crawford⁽⁴⁰⁾） Nu_{∞}

で規格化した。

$$Nu_{\infty} = 0.022 Re_m^{0.8} Pr^{0.5} \dots \dots \dots (6)$$

図で上限・下限をスケールアウトした領域はそれぞれ黒・白で塗り潰して表示した。また、せん断応力主流方向成分が零の領域も白く塗り潰した。図中リブ周りの一部ギザギザの分布は表示ソフトの補間不具合であり、実際のデータは滑らかに変化していることを付記しておく。図8(c)の $A_R = 1.0$ の場合にはリブ面におけるリブ間中央部の高熱伝達領域が正のせん断応力と対応しており、傾斜リブによる二次流れのためにこの領域はLeft面側に偏っている。また、リブ上流側直前部に負のせん断応

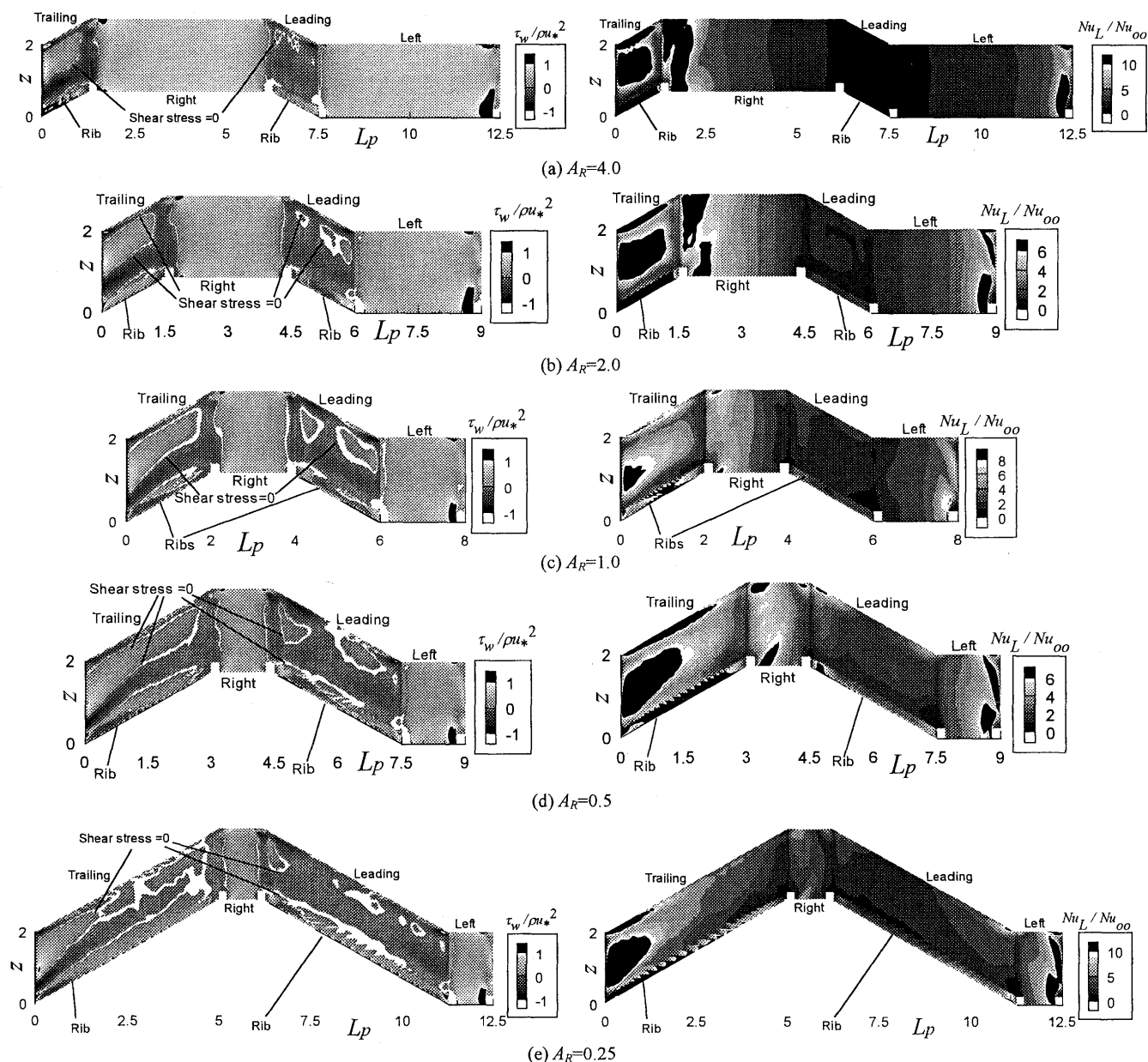


図9 時間平均壁面せん断応力主流方向成分(左)と局所Nusselt数(右)の四壁面上での分布(60°リブ, $Ro_o = 1$ の場合)

力と対応した高熱伝達領域が形成されている。側壁では、リブ周りで熱伝達率、せん断力ともに高くなるのはRight, Left両面に共通であるが、中央部では傾斜リブの二次流れによりLeft面で高く、Right面で低い値となる。これら $AR = 1.0$ の場合の特徴がどのように AR により変化するか調べると、 $AR > 1$ の場合(図8(a), (b))には、リブ面の幅が小さいためにリブ間中央部およびリブ直前部での高熱伝達領域がリブ面のほぼ幅方向中央にある。また、傾斜リブが短いために二次流れの強度が低く、熱伝達率の値自体は $AR \leq 1$ の場合よりも低くなる。 $AR < 1$ の場合(図8(d)(e))には、リブ間中央およびリブ直前各位置の高熱伝達領域はLeft面側に大きく偏り、局在化する。せん断応力分布を見てもリブ面のLeft面側ではせん断応力の高低両領域がみられるが、Right面側ではせん断応力が零に近い値となる。図3(d)(e)を見ると、

このRight面側の領域では主流速度も低く、 $AR < 1$ の扁平断面の場合に傾斜リブによって誘起された流れ場はRight面側に十分な運動量を輸送することが出来ないと考える。

図9に回転時($Ro_o = 1$)の時間平均壁面せん断応力主流方向成分およびNusselt数の分布を示す。各図のTrailing面(Pressure側)では静止時と同様なせん断力、Nusselt数分布が見られるが、Leading面(Suction側)ではせん断力の分布が小さくなり、Nusselt数も低くなる。平滑管や90°リブ管の場合にも、コリオリ力による二次流れにより、せん断力、Nusselt数の値がTrailing面で大きく、Leading面で小さくなり、側壁ではLeading面側からTrailing面側へ向ってNusselt数が上昇する^{(20)~(24)}。前述の様に AR が大きい場合にはこのコリオリ力の効果が大きく、 AR が小さい場合に比べてTrail-

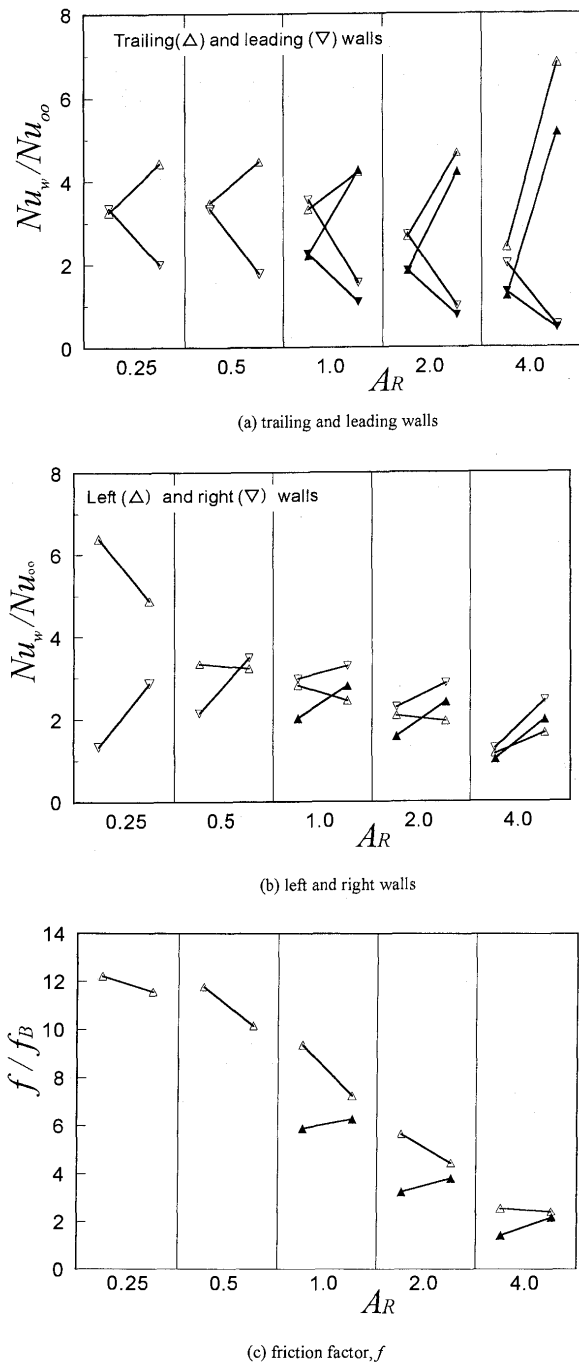


図10 回転と管路断面アスペクト比が壁面平均 Nusselt 数 Nu_w および摩擦係数 f に与える影響 (白, 黒の記号はそれぞれ 60° リブ, 90° リブ²³⁾の場合を表す。また, 各アスペクト比で左右のプロット点はそれぞれ静止, 回転 ($Ro. = 1$) の場合を表す)

ing 面と Leading 面の値の差は大きくなる。

図10に AR と各壁面平均 Nusselt 数 Nu_w および摩擦係数 f の関係を示す。 Nu_w と f の値は式(6)の Nu_∞ および下式で与えられる Blasius 式の値 f_B でそれぞれ規格化した。

$$f_B = 0.079 Re_m^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図中各 AR の値に対する左右2つのプロットはそれぞれ

れ静止, 回転 ($Ro. = 1$) の場合である。本研究の静止時 $AR = 1$ の場合のリブ面 Nu_w は, Chandra, et al.⁽⁶⁾の実験値 (90° リブ管で $Nu_w/Nu_\infty = 2.6$, 60° リブ管で $Nu_w/Nu_\infty = 3.3$, 実験条件: $Re_m = 30000$, リブ高さ・等価直径比 $= 0.063$, リブピッチ・リブ高さ比 $= 10$) と概ね一致する。但し, 実験条件と計算条件は異なることと, 実験での空間解像度は低い (幅方向3ヶ所) ことに注意が必要である。図10(a)で, 壁面平均 Nusselt 数が回転とともに Trailing 面で上昇, Leading 面で下降する様子はどの AR の場合も同様である。図中黒印で示した 90° リブの場合²³⁾に比べ 60° リブは静止時に高い値をとる。 $AR \geq 1$ では, AR の増加とともに回転時の Leading 面と Trailing 面の差は大きくなる。また, 図10(b)の側壁で静止時 (各左側のプロット点) の AR による変化を見ると, Left 面では AR の増加とともに単調減少, Right 面では $AR = 1$ で極大値をとる。静止時に傾斜リブが誘起した流れ場によって側壁 (Right, Left 面) の熱伝達は, $AR < 1$ では Left 面が高く (図8(d)(e)参照), $AR \geq 1$ ではほぼ同じ値となる。回転すると $AR < 1$ での Left, Right 面間の差は縮まり, $AR \geq 1$ では Right 面側が高くなる。 90° リブの側壁は回転とともに全て上昇を示すが, 60° リブでは Right 面で上昇, Left 面では $AR = 4.0$ を除いて減少する。傾斜リブの影響で, 静止時に $\bar{w}$, $\bar{\theta}$ のピークは Left 面側に偏り (図3, 図4), 熱伝達も Left 面側で高くなる (図8) が, 回転によってこのピークは Right 面側に移り (図6, 図7), Left 面の Leading 面寄りの熱伝達が低くなる (図9)。 $AR = 4.0$ の場合にはコリオリ力の影響が一番大きくなるために, Left 面側でも熱伝達が上昇したと考えられる。図10(c)の摩擦係数 f では, 静止時に 60° , 90° リブで AR の増加とともに減少するのは同じだが, 回転とともに 60° リブでは減少, 90° リブでは増加という逆の傾向を示す。

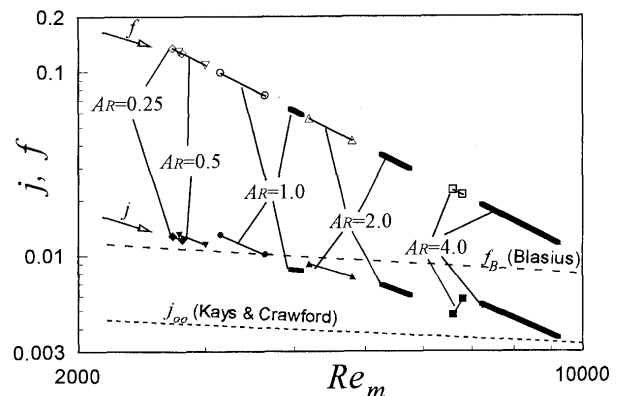


図11 回転と管路断面アスペクト比が摩擦係数 f および Colburn の j 因子に与える影響 (図中記号のプロットは 60° リブの結果であり, 各条件の左右のプロットはそれぞれ静止時, 回転時 ($Ro. = 1$) の結果を表す。また太線は村田・望月²³⁾の 90° リブの結果であり, 60° リブの場合とは逆に各線の左右端がそれぞれ回転時, 静止時の結果を表す)

表2 回転および管路断面アスペクト比による f と j の変化
(90° リブは村田・望月²³のデータ)

	A_R	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0
	γ	60°	60°	60° (90°)	60° (90°)	60° (90°)
$Ro_\infty=0$	f/f_B	12.23	11.78	9.38 (5.89)	5.66 (3.25)	2.56 (1.43)
	j/j_∞	2.98	3.06	3.09 (2.09)	2.30 (1.65)	1.32 (1.06)
$Ro_\infty=1$	f/f_B	11.57	10.16	7.25 (6.28)	4.45 (3.81)	2.43 (2.20)
	j/j_∞	2.87	2.73	2.47 (2.11)	2.01 (1.85)	1.62 (1.54)
Change by rotation	f/f_B	-5%	-14%	-23% (+7%)	-21% (+17%)	-5% (+54%)
	j/j_∞	-4%	-11%	-20% (+1%)	-13% (+12%)	+23% (+45%)

図11に摩擦係数 f と Colburn の j 因子で整理した管路平均値の結果を示す。図中太線は90°リブ管の結果²³であり、各線の右端が静止時を、左端が回転時 ($Ro_\infty=1$) を表す。また、記号で示す60°リブの場合には逆に、左側が静止時、右側が回転時となる。また、図11の数値を表2にまとめた。リブのついた面の面積割合がアスペクト比の上昇とともに小さくなるので $A_R=4.0$ の場合に f 値、 j 因子ともに最も低くなる。しかし、前述のように回転の影響を最も受けやすいのはこの高アスペクト比の場合であるため、90°リブの場合には回転による値の上昇は A_R が大きいほど大きくなる。しかし、60°リブでは $A_R=4.0$ の場合の j 因子のみ回転により値が増加し、その他の場合は回転により値が減少する。これは、傾斜リブが誘起した流れ場による静止時の値の上昇が大きく、回転コリオリ力との干渉の結果生じた回転時の流れ場による値の上昇が静止時のそれを上回れないためであると考えられる。

5. 結論

傾斜リブ付き管では、静止時にリブ間中央部およびリブ直前部の各Left面寄りに高熱伝達領域が発生する。側壁では、リブ面の長い低アスペクト比(1未満)の場合にLeft面での熱伝達がRight面に比べて高いが、高アスペクト比(1以上)ではほぼ同じ値となる。また、低アスペクト比の場合に主流方向速度と温度の間に非相似性が発生した。この非相似性は回転時には全てのアスペクト比において見られた。回転の影響は四壁面間の熱伝達率に分布を生じさせ、Pressure側、Suction側でそれぞれ熱伝達が増加、減少する様子は平滑・90°リブ管の場合と同様であった。しかし、60°リブ管の管路平均値ではアスペクト比4の j 因子を除いて、回転により f 値、 j 因子が減少した。コリオリ力と傾斜リブの二次流れ同士の干渉の結果生じた流れ場が f 値、 j 因子を減少させたと考えられる。

参考文献

- (1) 吉田豊明, ガスタービンの高温化と冷却技術, 日本ガスタービン学会調査研究委員会成果報告書 (1997), 1-4

- (2) 望月貞成・岡村隆成, 文献(1)と同じ, 48-63
- (3) Mochizuki, S., et al., Trans. ASME, J. of Turbomachinery, 119 (1997), 610-616
- (4) Mochizuki, S., et al., ASME Paper, 96-TA-6 (1996)
- (5) 村田章・他2名, 機論(b), 64-623 (1998), 2202-2207
- (6) Chandra, P.R., et al., Trans. ASME, J. of Turbomachinery, 110 (1988), 233-241
- (7) 廣田真史・他4名, 機論(b), 63-603 (1997), 1327-1335
- (8) Rau, G., et al., ASME Paper, 96-GT-541 (1996)
- (9) Baughn, J. W. and Yan, X., Enhanced Heat Transfer ASME, HTD-Vol. 202 (1992), 1-7
- (10) Ekkad, S. V. and Han, J. C., Int. J. Heat Mass Transf., 40-11 (1997), 2525-2537
- (11) Prakash, C. and Zerkle, R., Trans. ASME, J. of Turbomachinery, 117 (1995), 255-264
- (12) Stephens, M. A., et al., AIAA Paper, 95-2115 (1995)
- (13) Banhoff, B., et al., ASME Paper, 96-TA-7 (1996)
- (14) Launder, B. E., et al., J. Fluid Mech., 183 (1987), 63-75
- (15) Huser, A. and Biringen, S., J. Fluid Mech., 257 (1993), 65-95
- (16) Gavrilakis, S., J. Fluid Mech., 244 (1992), 101-129
- (17) Madabhushi, R. K. and Vanka, S.P., Phys. Fluids, A 3-11 (1991), 2734-2745
- (18) 梶島岳夫・他2名, 機論(b), 57-540 (1991), 2530-2537
- (19) 数値流体力学編集委員会編, 乱流解析, (1995), 79, 97, 東大出版会
- (20) 村田章・望月貞成, 機論(b), 64-623 (1998), 2196-2201
- (21) 村田章・望月貞成, 機論(b), 64-627 (1998), 3781-3787
- (22) Murata, A. and Mochizuki, S., Proc. of 11th International Heat Transf. Conf., Kyongju, Korea, 6 (1998), 565-570
- (23) 村田章・望月貞成, 機論(b), 64-628 (1998), 4129-4136
- (24) Murata, A. and Mochizuki, S., Int. J. Heat Mass Transf., 43-7 (2000), 1243-1259
- (25) 村田章・望月貞成, 機論(b), No. 99-1099, 投稿中
- (26) 村田章・望月貞成, ガスタービン学会誌, 28-2 (2000), 29-37
- (27) Taslim, M. E. and Spring, S. D., J. of Thermophys. and Heat Transf., 8-3 (1994), 555-562
- (28) Korotky, G. J. and Taslim, M. E., ASME Paper, 96-GT-356 (1996)
- (29) Han, J. C., et al., Trans. ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power, 107 (1985), 628-635
- (30) 梶島岳夫・他3名, 機論(b), 63-614 (1997), 3247-3254
- (31) Germano, M., et al., Phys. Fluids, A 3-7 (1991), 1760-1765
- (32) Lilly, D. K., Phys. Fluids, A 4-3 (1992), 633-635
- (33) Meneveau, C., et al., J. Fluid Mech., 319 (1996), 353-385
- (34) Moin, P., et al., Phys. Fluids, A 3-11 (1991), 2746-2757
- (35) Amsden, A.A. and Harlow, F.H., J. of Comp. Phys., 6 (1970), 322-325
- (36) Patankar, S.V., et al., Trans. ASME, J. of Heat Transf., 99 (1977), 180-186
- (37) Kim, J. and Moin, P., J. Comp. Phys., 59 (1985), 308-323
- (38) Zang, Y., et al., J. Comp. Phys., 114 (1994), 18-33
- (39) Murata, A. and Mochizuki, S., Int. J. Transport Phenomena, MS# 99 Nh/156, in press
- (40) Kays, W. M. and Crawford, M. E., Convective Heat and Mass Transfer, 3rd ed., (1993), 316, McGraw-Hill

高温下でのメタン-空気予混合円管バーナの吹消えと逆火

Blowoff and Flashback of a Methane - Air Premixed Bunsen Burner at High Temperature

倉田 修*¹
KURATA Osamu

高橋 三餘*¹
TAKAHASHI Sanyo

キーワード：吹消え，逆火，燃焼速度，メタン-空気，円管バーナ，希薄，高温，経験式

Blowoff, Flashback, Burning velocity, Methane-air, Bunsen burner, Lean, High temperature, Empirical formula

Abstract

The empirical formula of blowoff and flashback of the premixed methane-air Bunsen (Cylindrical) burner at high temperature were introduced. The experimental range was 303 K < T_u < 1023 K, 0.1 MPa < P < 0.3 MPa, and 0.45 < ϕ < 1 and the ambient was air. The empirical formula of blowoff are:

$$U_b \propto S_u^2 T_u^{-2.38} P^{0.79}$$

and also,

$$M_b P^{-1.29} \propto \exp(-E/(RT_B))$$

where U_b and M_b are blowoff velocity and blowoff mass flow rate, S_u is burning velocity, and T_B is adiabatic flame temperature. The latter formula is independent of T_u and S_u , and much easier for handling. The empirical formula of flashback is:

$$U_f \propto S_u^2 (T_u^{-1} T_m^{-0.5}) P$$

This formula seems in good accordance at T_u higher than 573 K.

1. 緒言

再生式セラミックガスタービン用予混合希薄燃焼器の燃焼器入口空気温度は 1023 から 1123 K 程度の高温になるため，高温下での予混合燃焼器の希薄側の保炎特性を知る必要がある。一方，従来から吹飛びや逆火などの保炎特性は燃焼速度などに強く依存するとされている⁽¹⁻⁴⁾。例えば，円管（ブンゼン）バーナの保炎はリム近傍の未燃混合気速度と燃焼速度が釣り合う時の速度勾配により説明され⁽¹⁾，再循環域を有する保炎器の吹消えは，ダムケラー数を用いて説明される⁽³⁾。しかし，高温における保炎器の吹消えや逆火について燃焼速度などの影響を実験的に調べた例は無い。高温下でのメタン-空気層流燃焼速度については，本報とほぼ同じ装置とバーナにより測定⁽⁷⁾を行ない，CHEMKIN を用いた数値計算値と比較し平均 9% の誤差内で一致する⁽⁸⁾ことを既に報告している。円管バーナ単体だけでは，セラミックガスタービン用の燃焼器としての燃焼負荷を満たし，広い流量範囲を確保することは困難であるが，燃焼器としての保炎性能を上げる目的で，マルチの円管バーナにする⁽⁸⁾ことや，

マルチの予混合 2 重管バーナにする⁽⁹⁾ことが考えられる。その基本的な保炎性能を把握する目的で，メタン-空気予混合円管バーナの燃料希薄側の吹消え及び逆火の燃焼速度，1023 K までの予熱温度，雰囲気圧力に対する影響などを実験により調べた。

記号

C_p	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	定圧比熱
d	m	バーナ内径
dc	m	消炎距離
E	kJ kmol^{-1}	活性化エネルギー
g	s^{-1}	境界速度勾配
K		カルロピッツ数
M	kg s^{-1}	未燃混合気質量流量
Nu		ヌッセルト数
P	MPa	雰囲気圧力
R	$\text{kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$	ガス定数
Re		レイノルズ数
S_u	ms^{-1}	層流燃焼速度
T	K	ガス温度
T_m	K	ガス平均温度 $T_m = (T_u + T_B)/2$
T_B	K	断熱火炎温度

原稿受付 1999 年 12 月 10 日

* 1 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2

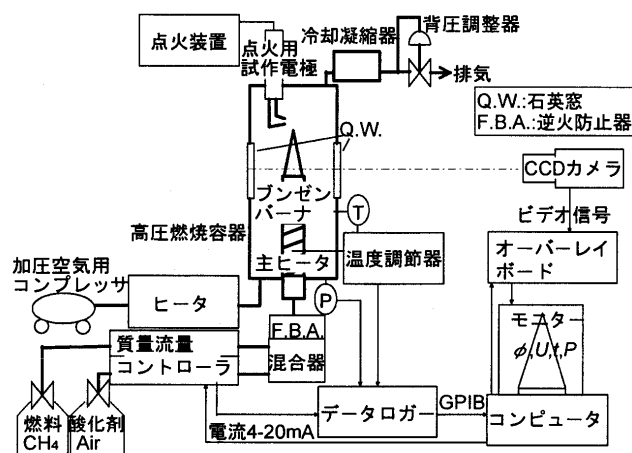


図1 実験装置

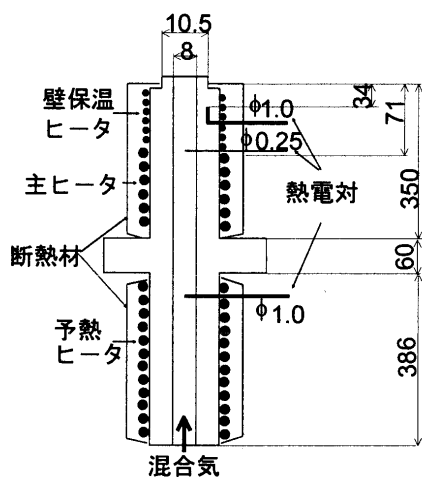


図2 予混合円管バーナ

U	ms^{-1}	平均ガス速度
δ	m	火炎帯厚み
λ	$\text{kJm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$	熱伝導率
ρ	kgm^{-3}	密度
ϕ		当量比
添え字		
b	blowoff	吹消え
f	flashback	逆火
u	unburnt	未燃ガス, 予熱部

2. 実験装置と方法

実験装置を図1に示す。実験装置は、高温下で燃焼速度の測定に用いた既報⁽⁷⁾の装置と光学系を除いてほぼ同じで、燃料に純度99.99%のメタンガスを、酸化剤に $\text{O}_2:21\%/\text{N}_2:\text{Balance}$ ガスを、高压容器内の雰囲気にはガスの予熱温度以下に予熱した加圧空気をを用いた。実験に用いた予混合円管バーナを図2に示す。円管バーナは内径8.0 mm、外径10.5 mmのステンレス製とし、主ヒータのほかにバーナ出口壁保温ヒータを設け、バーナ出口の半径方向ガス温度分布が一様になるよう、バーナ出口壁温度を設定温度と同じレベルに制御した。その

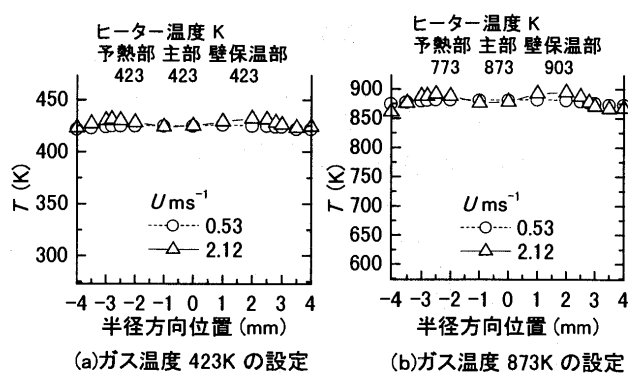


図3 円管バーナの半径方向出口温度分布

代表的な温度分布を図3に示す。吹消え及び逆火速度の測定は、ガスの予熱温度 (T_u) を常温 (303 K) から 1023 K まで、圧力 (P) を 0.1 MPa から 0.3 MPa まで、当量比 (ϕ) を 1.0 から保炎可能な燃料希薄範囲まで変化させて行なった。実験に際しては、まず火炎が安定である流速で燃焼させ、バーナリムが熱的に平衡になった後、 ϕ が一定になるようメタン及び空気の両流量を徐々に増加あるいは減少させていき、目視とバーナ上流部の熱電対の温度変化から吹消えと逆火のそれぞれを確認した。なお、常温では、バーナ出口壁保温ヒータを取除いても、逆火時のリム温度の上昇が大きく、実験結果は不採用とした。

3. 実験結果

図4にメタン-空気予混合円管バーナの各圧力に対する吹消え速度 (U_b) と逆火速度 (U_f) の当量比依存性を、 T_u をパラメータにして示した。縦軸はメタン-空気混合気の当量比 (ϕ) を、横軸はバーナの断面平均ガス速度 (U) を表わす。図4の上側の軸には4.1に説明されている境界速度勾配 (g) を合せて示した。各 T_u において、 U_b は丸記号で、 U_f は対応する上三角記号で示してある。安定な保炎範囲は上三角記号と丸記号の間であり、 ϕ を一定に保ったまま U を増減させると、丸記号より右側は吹消え、上三角記号より左側は逆火する。さて、 T_u の増加により、 U_b と U_f は共に大きく上昇している。例えば P が 0.1 MPa、 ϕ が 0.8 では、 U_b は T_u が 303, 423, 573, 723, 873 K の時、それぞれ 0.68, 1.24, 3.2, 6.3, 10.7 ms^{-1} となり、303 K における U_b の 1.8, 4.7, 9.3, 16 倍の値を示している。また、 U_f は T_u が 423, 573, 723, 873, 1023 K の時、それぞれ 0.67, 1.3, 2.1, 4.3, 8.1 ms^{-1} となり、423 K における U_f の 1.9, 3.2, 6.4, 12 倍の値を示している。 P が 0.15, 0.2, 0.3 MPa の際も同様に、 T_u の増加により、 U_b と U_f は共に大きく上昇していた。なお、実験は層流の範囲で行なったため、流れが乱流となる高圧力かつ ϕ が 1 近くのデータは抜けている。

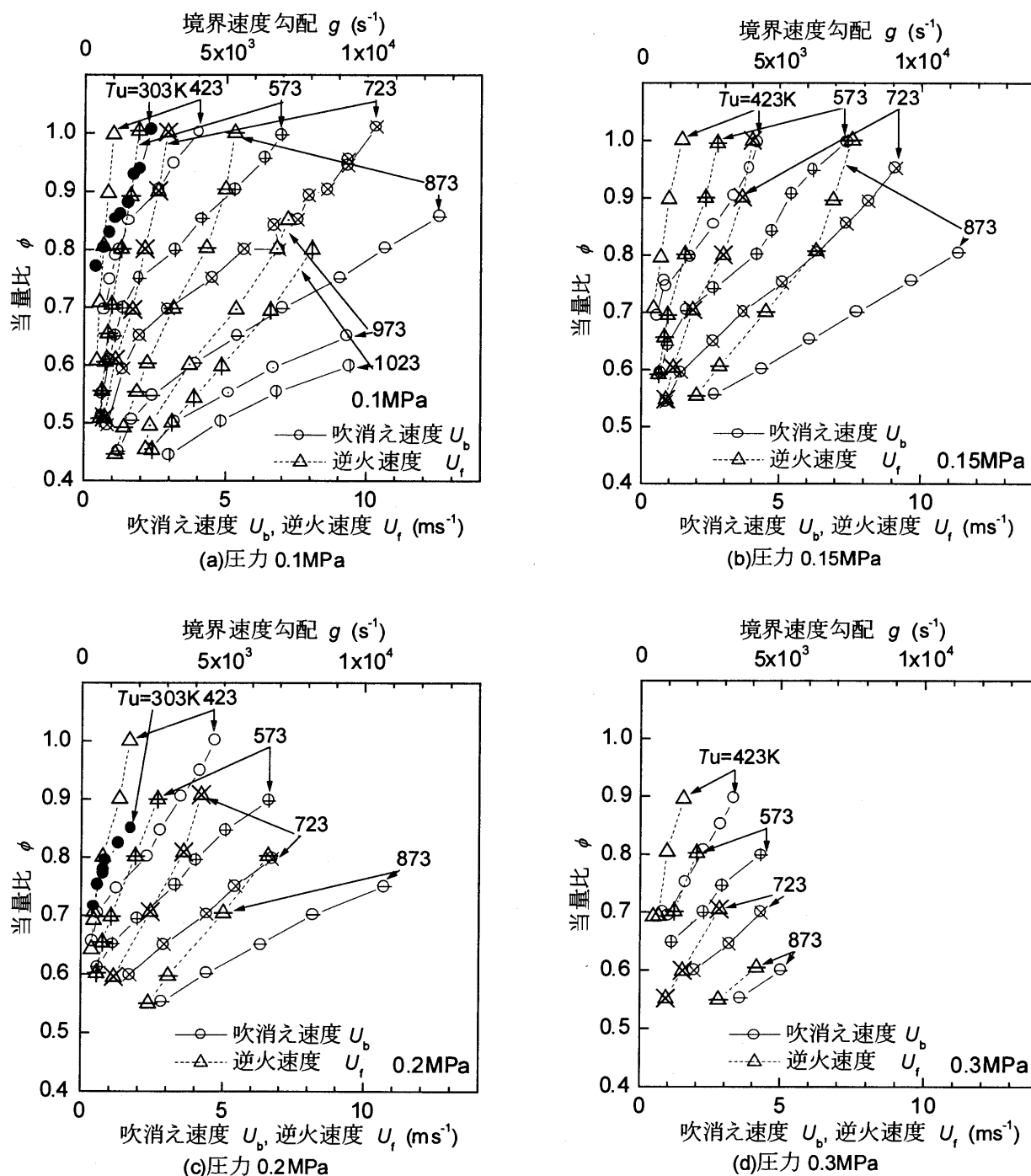


図4 吹消え速度と逆火速度への予熱温度と圧力の影響
(メタン-空気, プンゼンバーナ, 内径 8.0 mm, 外径 10.5 mm, 雰囲気: 加熱空気)

4. 考察

4.1 吹消え速度の燃焼速度, 予熱温度, 圧力の影響

円管バーナの吹消えや逆火は, リム近傍の境界層における未燃混合気速度と燃焼速度が釣り合う時の境界速度勾配で整理, 説明されている⁽¹⁾。リム近傍で局所ガス速度と局所燃焼速度の大きさが一致し, かつ勾配も一致する接点で火炎は安定に保たれる。ガス速度と燃焼速度の接点が無く, ガス速度が燃焼速度より大きいと火炎は吹消え, 逆に小さいと火炎は逆火する。円管バーナとノズルバーナでは, バーナ径が消炎距離以上ならば, g で整理

した吹消えと逆火はバーナ径に依らず当量比に対し同じ値となる。本実験の円管バーナ直径は 8.0 mm と一定であり, 流れは発達したポアズイユ分布となっているので,

$$g = 8U/d = 1000U \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる。ここで, g 自体には, 層流燃焼速度 (S_u), T_u , P の影響は陽には含まれていないが, U , S_u 共に, T_u , P の関数である。したがって, P が一定であれば, T_u の増加に伴い, U , S_u 共に増加するため, g も増加すると予想されるが, 図4を見ると, 確かに, 吹消えや

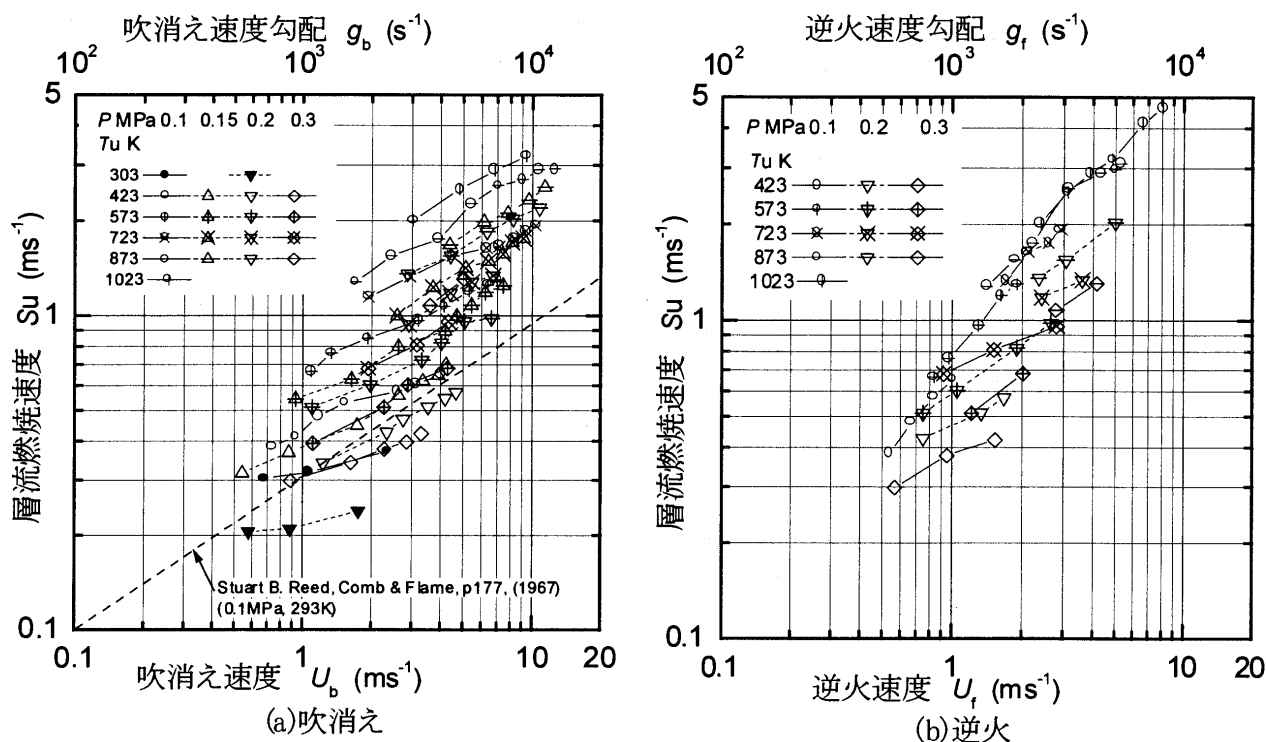


図5 吹消え速度や逆火速度と燃焼速度との関係

逆火になる g も大きく増加していることが分かる。

Reed⁽²⁾は g_b と火炎伸長のカルロビッツ数 (K) を用いて、常温、大気圧 (～減圧下) でのアセチレン-空気、メタン-空気、プロパン-空気、ブタン-空気混合気の層流から乱流までの円管バーナの吹飛びの結果を集め、 $0.7 < \phi < 1$ の範囲で経験式(2)として表わしている。

$$K = g_b \delta_u / S_u = 0.23 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式(2)から g_b に対する T_u , P の影響が表わされる。予熱帯の厚み (δ_u) は熱理論による解析から式(3)で近似できる。

$$\delta_u \approx \lambda / (C_p \rho_u S_u) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、熱物性値の T , P 依存は式(4)で表わせる。

$$(\lambda / C_p)_u \propto T_u^{0.5}, \quad \rho_u \propto P / T_u \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで λ / C_p は T_u で評価した。これは λ / C_p を δ_u の計算のために用いており、 δ_u の範囲では T が指数関数的に増加するため、 T の代表値として T_u を用いたものである。

式(3)および(4)を式(2)に代入すると、

$$\begin{aligned} K &\approx g_b \lambda / (C_p \rho_u S_u^2) \\ &\propto g_b S_u^{-2} T_u^{1.5} P^{-1} \\ \therefore g_b &\propto S_u^2 T_u^{-1.5} P \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

となる。

図5は両対数グラフの縦軸に S_u 実験値⁽⁷⁾⁽⁸⁾、横軸に U_b と U_f の実験値を取り、結果を整理した。図5の上

側の軸には g を合せて示した。記号 (黒抜き, 白抜き, +, ×, -, l) は T_u が 303, 423, 573, 723, 873, 1023 K の時を、記号 (○, △, ▽, ◇) は P が 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 MPa の時を示している。図5(a)には Reed が前述のように、0.1 MPa, 293 K において実験結果を整理して得た文献2の図7の線を示す。常温、大気圧の実験結果は Reed の結果とやや異なる。この原因として、燃焼速度の実験値が低当量比側でやや大きかったこと⁽⁸⁾が考えられるが、文献2の図7のデータもやや巾を持って散らばっており、ここで用いた常温における実験値もこれらのデータから大きくはずれていない。

ところで、著者らの実験結果は、 T_u が常温～1023 K, P が 0.1～0.3 MPa の範囲にある点で、Reed の取扱った範囲と異なっている。図5(a)では、 $T_u \geq 423$ K で U_b に対する S_u のべき数はほぼ2で一定とおける。ここで U_b (あるいは g_b) に対する T_u や P のべき数は、図5(a)の $U_b \propto S_u^2$ の直線上で、 P を一定にした時の T_u と U_b の関係や、 T_u を一定にした時の P と U_b の関係から算出する。 T_u が 423 から 1023 K まで、 P が 0.1 から 0.3 MPa までの範囲では、 T_u のべき数は平均で -2.38, P のべき数は平均で 0.79 であった。ここで導かれた経験式は式(6)になる。

$$U_b \propto S_u^2 T_u^{-2.38} P^{0.79} \quad \dots\dots\dots (6)$$

あるいは、

$$g_b \propto S_u^2 T_u^{-2.38} P^{0.79} \quad \dots\dots\dots (6')$$

となる。式(5)と(6')を比べると、 S_u と P のべき数はほ

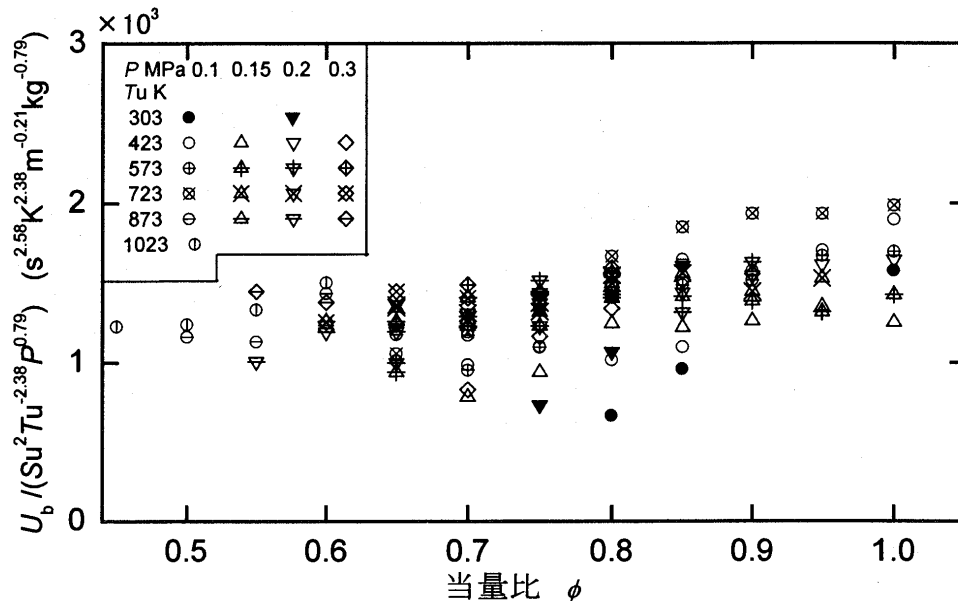


図6 吹消え速度の依存式と当量比の関係

は同じものの、 T_u のべき数が異なっている。この原因として、式(5)で λ/C_p の評価に T として T_u を用いたが、実際には T_u よりもやや高めの温度を用いた方が適切であったとも考えられる。また、Reed の経験式は常温、大気圧下の結果であり、本実験の高温側の結果が影響を与えたためとも考えられる。

なお、Reed のカルロピッツ数を用いて整理した保炎理論に対して、カルロピッツ数自体は $U \gg S_u$ の範囲で妥当性のあることが指摘⁽⁴⁾⁽⁵⁾されている。ただし、Reed が整理に用いた実験結果は正当と考えられるから、常温、大気圧での経験式は円管バーナに対してなお有効と考えられる。

さらに、バーナリム厚が 3 mm 以上では火炎基部に再循環域ができ火炎が安定化するという報告⁽⁵⁾もあるが、実験に用いたバーナのリム厚は 1.25 mm であり、そのような問題は生じないと考えられる。

図 6 は縦軸に経験式(6)を、横軸に当量比を取り、実験結果を整理した。経験式は高温、低当量比側ではほぼ一定値になる。常温のデータがばらつく原因としては、常温ではバーナ出口壁保温ヒータを取除いたが、実験装置にはバーナリムを冷却する機構が無いため、リム温度が常温よりやや高めになっていたことが考えられる。

さて、式(6)に、 S_u の T_u 、 P 依存性の経験式と S_u の熱理論に基づくアレニウス型の反応式を代入し、 S_u の項を除去する。メタン-空気混合気の S_u は T_u 、 P の影響を経験式(7)の様に表わせる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$S_u = S_{u0}(T_u^{1.5 \sim 2.1})(1 - 0.5 \log(P/P_0))$$

$$S_{u0} \text{ は } 303 \text{ K, } 0.1 \text{ MPa での } S_u, P_0 = 0.1 \text{ MPa} \\ (303 \text{ K} < T_u < 873 \text{ K, } 0.1 \text{ MPa} < P < 0.3 \text{ MPa, } 0.5 < \phi < 1.0) \quad \dots(7)$$

式(7)の T_u のべき数は $T_u < 500 \text{ K}$ では飯島らの示し

た⁽⁶⁾1.6 付近にあり、 $500 \text{ K} < T_u < 873 \text{ K}$ では著者らの文献 7 の図 10 に示すように 1.5~2.1 の間にある。また、熱理論⁽³⁾により S_u は式(8)の様に表わせる。

$$\rho_{u0} S_{u0} \propto \exp(-E/(2RT_B)) \quad \dots(8)$$

さらに、以下の関係式(9)などを用いた。

$$M_b = (\pi/4)d^2 \rho_u U_b \quad \dots(9)$$

となる。また、 $U_b \equiv g_b^{-1}(d)$ と置ければ、

$$M_b = (\pi/4)d^2 \rho_u g_b^{-1}(d) \quad \dots(9')$$

となる。式(6)に式(7)(8)(9)を代入し整理する。

$$S_u = S_{u0}(T_u^{1.5 \sim 2.1})(P/P_0)^{-0.25} \\ \propto (T_u^{1.5 \sim 2.1})P^{-0.25} \exp(-E/(2RT_B))(T_0/P_0)$$

ここで、数値 $1 < a < 3$ において、 $(1 - 0.5 \log a) \doteq a^{-0.25}$ の関係を用いた。よって

$$M_b \propto (\pi/4)d^2 P/T_u U_b \\ \propto d^2 P/T_u ((T_u^{1.5 \sim 2.1})P^{-0.25} \exp(-E/(2RT_B)))^2 T_u^{-2.38} P^{0.79} \\ \propto d^2 P^{1.29} (T_u^{-0.38 \sim 0.82}) \exp(-E/(RT_B))$$

となる。整理式の T_u のべき数は T_u に対し平均的には 0 を通り影響が小さいと考えられる。このため T_u の項を省略し式(10)を得る。

$$M_b P^{-1.29} \propto \exp(-E/(RT_B)) \quad \dots(10)$$

図 7 は横軸に T_B^{-1} を、縦軸に $M_b(P/P_0)^{-1.29}$ を取り、式(10)の結果を整理した。 $M_b(P/P_0)^{-1.29}$ は T_B^{-1} に強く依存し、 T_B^{-1} に対し片対数グラフ上でやや巾を持った線で示されている。この線からやや外れているのは、常温と 1023 K におけるデータで、この線に対し、 $M_b(P/P_0)^{-1.29}$

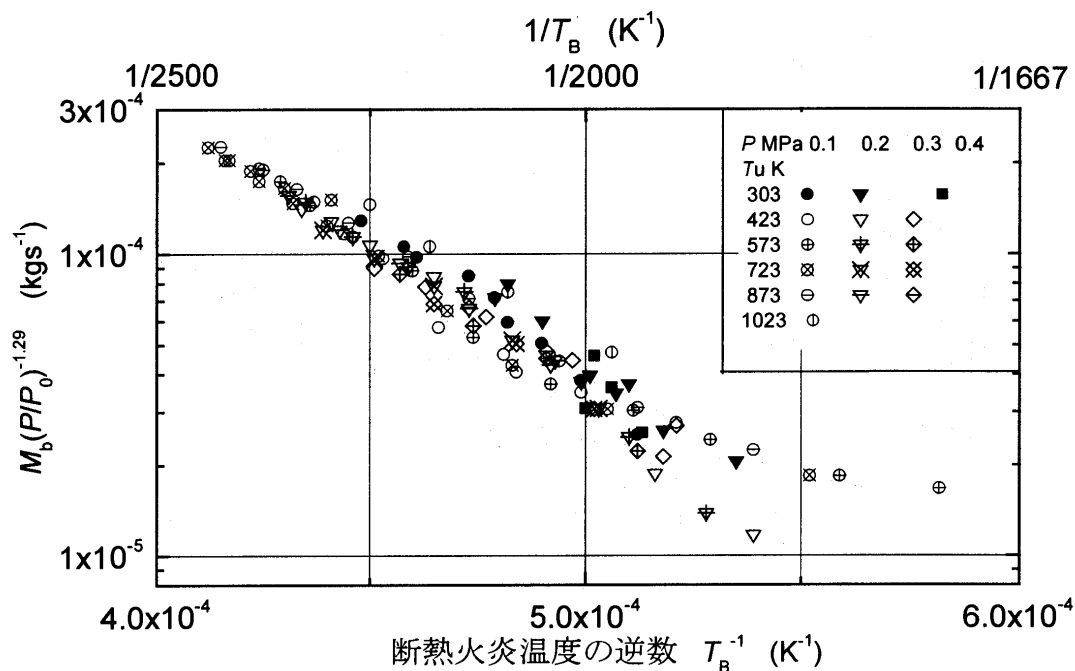


図7 断熱火炎温度で整理した吹消え流量

が同じ時、 T は約 40 K 離れている。この原因として、式(10)を導く時に T_u のべき数を省略したことや、常温においてリム温度がやや高くなっていたことが考えられる。

式(10)及び図7から、高温下での M_b は T_b で整理され、 T_u に陽に影響されないことが明らかになった。異なるバーナでは、 M_b を式(9)に置き換える。式(10)は吹消えを M_b , P , T_b の3項で表わした。 T_b は ϕ , T_u , P から簡単に計算できる⁽¹⁰⁾。これに対して、式(6)は S_u を計算⁽⁸⁾しなくてはならず、式(10)に比べ煩わしい。

ところで、 M_b は $T_b = 2000$ K を境に T_b^{-1} に対する依存性が若干異なっている。 $T_b = 2000$ K は用いた円管バーナの常温における希薄側保炎限界にほぼ相当し、火炎の高さが低くなることから、この温度を境に保炎特性が変化していることが考えられる。

4.2 逆火速度の燃焼速度、予熱温度、圧力の影響

境界速度勾配理論では U と S_u の釣合い位置について明確には示されていない。バーナリム温度は火炎温度より低いので、バーナリムと火炎の間には消炎層が形成されるが、消炎層外側の U が S_u に等しくなった時に逆火が生じると仮定する。境界速度勾配から、

$$S_u = dcg_f, \therefore U_f = S_u d / dc \quad (11)$$

となる。一方、消炎層の厚さ (dc) は、流管の管壁による放熱と、火炎の発熱が等しい時に消炎が起こるとした熱理論の式⁽³⁾として、式(12)のように表わされる。

$$dc = 2Nu^{0.5}\lambda / (Cp\rho_u S_u) \quad (12)$$

これら両式と、

$\lambda/Cp \propto T_m^{0.5}$, $\rho_u \propto P/T_u$ 及び、 T_m で評価した Nu はほぼ一定とすると、 U_f は、

$$U_f \propto S_u^2 (T_u^{-1} T_m^{-0.5}) P \quad (13)$$

なる依存性を持つこととなる。

ここで λ/Cp は T_m で評価した。これは、 λ/Cp は熱伝達率の計算に用いられているが、消炎層内では直線的な温度分布をしており、熱伝達率を T_m で評価するためである。

図8に、式(13)に基づいて、 U_f の S_u などへの依存性を示した。この依存性で整理した値は T_u が低い時には、 ϕ に対し一定とはならない上、 T_u の高い時の値とも大きく離れている。しかし、 $T_u \geq 573$ K, P が 0.3 MPa までの条件では、依存性を導出する際に多くの仮定がなされているにも拘らずほぼ一定の値を示しており、こうした範囲での U_f の予測は可能であると考えられる。

なお、バーナリムの上面は完全には温調し難いと考えられる。J. Forsyth⁽¹¹⁾は逆火に影響を与える因子として、火炎面積、ガス組成、 P , T_u , バーナ形状の他にバーナの材質や熱伝導率があることを示している。著者らの実験では、極力温調をかけ、バーナが熱平衡に達してから逆火の測定を行なっている。火炎からの入力熱は壁保温ヒータの温調用の熱電対(図1, バーナ出口から 34 mm 上流に設置)に反映し、壁保温ヒータの出力を下げる。この壁保温ヒータの温度は未燃時に出口温度分布が一樣になる(図3)よう設定している。著者らは、ほぼ同じ実験装置にシュリーレン光学系を加えて火炎内縁像の面積法により S_u を測定している⁽⁷⁾。また、 S_u 実験値は CHEMKIN による S_u 数値計算値と平均 9% で一致することを示している⁽⁸⁾。 S_u 実験値と S_u 数値計算値が精度良く合うことは、バーナ出口断面のガス温度分布が、燃焼時にも設定予熱温度に近いことの証左と考えられる。

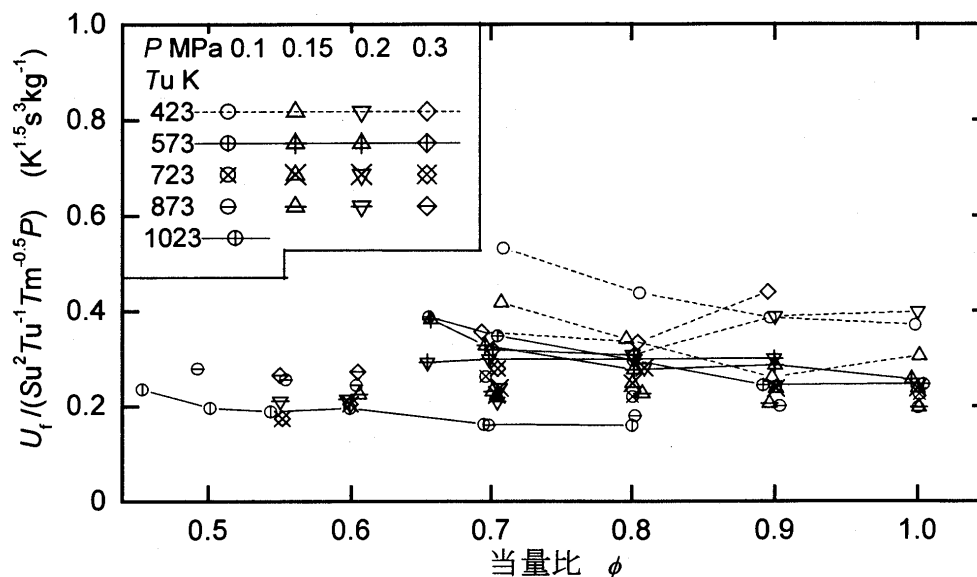


図8 逆火速度の燃焼速度などへの依存式と当量比の関係

したがって、リム温度の上昇が大きく、実験結果を不採用とした常温以外では、バーナリムの温度上昇によるデータのばらつきは少ないと考えられる。

5. 結論

メタン-空気予混合円管バーナの燃料希薄側の吹消えおよび逆火を、予熱温度が常温から 1023 K、圧力が 0.1 MPa から 0.3 MPa、当量比が 1 から希薄側、層流の範囲内において実験して結果を調べ整理し、以下の結論を得た。

- (1) Reed の経験式を基に高い予熱温度での、吹消えの燃焼速度などへの経験式を実験的に求めた。

$$U_b \propto S_u^2 T_u^{-2.38} P^{0.79}$$

また上式から燃焼速度を断熱火炎温度で代表させ、吹消え流量への経験式を求めた。

$$M_b P^{-1.29} \propto \exp(-E/(RT_B))$$

- (2) 消炎層の端で燃焼速度と逆火速度が等しくなるとした逆火速度の経験式は、573 K 以上の予熱温度では比較的良くあてはまる。

$$U_f \propto S_u^2 (T_u^{-1} T_m^{-0.5}) P$$

参考文献

- (1) Session of Flame Stabilization and Quenching, 3rd Int. Comb. Sympo., (1948), pp. 3-20 & pp. 68-101
- (2) S. B. Reed, Flame Stretch-A Connecting Principle for Blow off Data, Comb & Flame, 11, (1967), p. 177
- (3) 正田, 秋田, 燃焼概論, コロナ社, 東京, 1987, p. 70 & p. 187
- (4) 安里, 河村, 伊藤, 松井, バーナ火炎の安定化機構に関する実験的研究, 機論 B, 52, (S61), p. 2712 & p. 3594
- (5) 小泉, 岩井, 楊, 土橋, 平野, 予混合バーナ火炎の付着点近傍の熱流体力学的構造, 燃焼の科学と技術, 6, (1999), p. 273
- (6) T. Iijima, T. Takeno, Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity, Comb & Flame, 65, (1986), p. 35
- (7) O. Kurata, S. Takahashi, Y. Uchiyama, Influence of Preheat Temperature on the Laminar Burning Velocity of Methane Air Mixtures, SAE Paper No. 942037, (1994), p. 119
- (8) 倉田, 高橋, 内山, 高温下でのメタン-空気層流燃焼速度の数値計算, 日本ガスタービン学会誌, 25-97, (1997), p. 65
- (9) 倉田, 他, 予混合希薄燃焼技術の研究, 第 41 回機械技術研究所研究講演会資料, (1999), p. 77
- (10) 水谷, 燃焼工学, 森北出版, 東京, 1986, p. 207

小型セラミックガスタービンを用いた 自動車用ハイブリッドシステムの研究 (第3報)

Research on Ceramic Gas Turbine / Electric Hybrid System for Automotive Use (Part 3)

伊藤 高根^{*1}
ITO H Takane

呉 英毅^{*2}
GO Eiki

キーワード: Hybrid Engine, Ceramic Gas Turbine, Fuel Economy, Nox Emission, Simulation

Abstract

This paper describes potentials on fuel economy and NOx exhaust emissions of a series hybrid urban bus system equipped with a ceramic gas turbine engine (CGT). The simulating program developed in-house was used to analyze influences of several parameters of each main components of the hybrid vehicle system on the performance of the bus running on the modified bus driving cycle. The basic data used in this analysis for a CGT was derived from the results of "the Automotive 100 kW CGT Project" of Japan. A dynamic response of a CGT-Generator rotating system was very much improved by introducing of "Assisting system" in which the generator was used as an acceleration-deceleration-assisting device when much acceleration or deceleration was needed. This system would make a CGT operate along the optimum operating line (fuel minimum line) even under the unsteady driving conditions. This analysis showed that the fuel economy of an optimized CGT/Electric hybrid bus system would be expected to be about 2.7 times compared with a conventional diesel engine driven bus, and Nox emission would be approximately 1/28.

1. はじめに

自動車用駆動システムについては、エネルギーのほぼ100%を石油系燃料に頼っていること、排気規制の強化にもかかわらず大都市内において環境基準が達成されていない場所が多く、その原因の大半が自動車によるものである事など大きな問題をかかえている。著者等は、内燃機関として熱効率、排気特性に優れた小型セラミックガスタービン (CGT) を用いたハイブリッドシステムを取り上げ、都市内路線バスへ適用した場合の走行燃費等を従来のディーゼルエンジン車等と比較検討し、シリーズ式ハイブリッドシステムが燃費の面で優れていること⁽¹⁾、また主要要素であるエンジン、発電機、モータ、バッテリーがモード走行中に実際にどのように作動しているかを解析するとともに、CGTを用いたハイブリッドシステムでは、「発電機アシスト」制御方式が有効であり、電池の特性およびその充放電制御を含むシステム全体の制御は重要であること等を報告してきた⁽²⁾。その後、

これらの知見をもとに、さらにシステムの最適化をはかることにより、バス実走行モードにおける走行燃費およびNOx排気ガス特性に関し、現状のディーゼルエンジン直接駆動システムに比べ圧倒的によい結果が得られたので第3報として報告する。

2. ベース車両諸元及び解析方法

2.1 ベース車両と主要要素の諸元

図1に今まで検討してきたシリーズ式ハイブリッドシステムの構成図を示す。前報と同様に実際の路線バスの車両諸元を参考に、ディーゼルエンジンに関連する部品を図1に示すようなハイブリッド関連部品に載せ変えたとして、重量修正のみを行いベース車両の諸元とした。表1に今回の計算に用いたベース車両の主要諸元を示す。

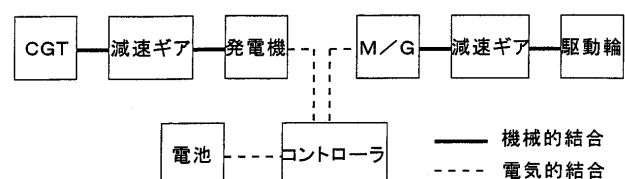


図1 シリーズ式ハイブリッドシステム

原稿受付 1999年10月14日

*1 東海大学 工学部 生産機械工学科
〒259-1292 平塚市北金目1117

*2 花王

表1 車両及び駆動系の諸元

項 目	単 位	諸 元
車両総重量	k g	1 5 5 2 8
全面投影面積	m ²	6. 1 2 5
転がり抵抗係数		0. 0 1 2
C d 値		0. 5 0
タイヤ有効半径	m	0. 5 0
エンジン形式		CGT
定格出力	k W	1 1 3
定格回転数	r p m	1 0 0 0 0
モータ形式		PM
定格出力	k W	8 6. 1
最高回転数	r p m	2 8 3 4
定格回転数	r p m	1 0 6 3
重量	k g	4 2 5
発電機形式		PM
定格出力	k W	5 0
最高回転数	r p m	1 0 0 0 0
定格回転数	r p m	6 0 0 0
重量	k g	9 0
電池形式		鉛電池
エネルギー密度	W h / k g	4 2
出力密度	W / k g	2 0 0
重量	k g	7 0 0

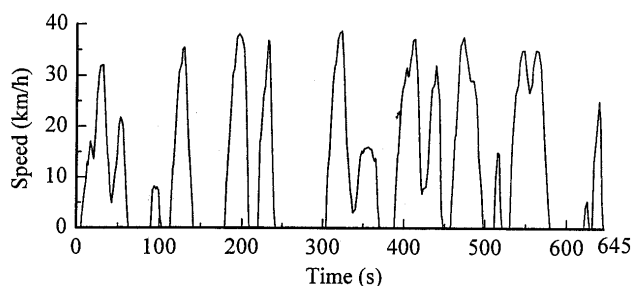


図2 バス実走行モード

定格点における CGT／発電機系の発電効率は 40%，モータの効率は 90% である。

2.2 走行モード

前報では、時刻毎の走行状態と各要素の作動点との関係を明確にするため、バス用に定められたモードではないが、走行状態の明確な 10—15 モードを採用した。今回はシステムの最適化により走行燃費および排気特性の改善効果を知るのが目的であるため、バス実走行モードを用いた。これは東京都区内のあるバス路線を走行して得られた実測値の一部をもとにモデル化したものであり、バス実走行モードの最高速度は 38.7 km/h、平均速度 12.0 km/h、最大加速度 1.54 m/s²、最大減速度 2.17 m/s² で、走行距離 2.16 km、所要時間は 645 秒である。前報の 10—15 モードに比べると平均車速が低く、加減速がきつくなっている。図 2 にバス実走行モードの各時刻の走行速度を示す。

2.3 ベースシステム各要素のモデル化と解析方法

CGT、発電機、モータ、バッテリー等のモデル化および解析方法は、前報で述べた方法とまったく同じであるため、改めて述べることは省略するが、これらの各要素

毎に与えられた静特性（部分負荷特性を含む）を用い、CGT／発電機系およびモータ／車両系の運動方程式を与えられた走行モードに従って時々刻々解くことにより、その時刻の燃料流量、排気ガス量等を計算し、それをモード走行の全時間にわたって積分し走行燃費等を計算することを基本としている。なお、モード走行中バッテリーの充放電が繰り返し行われる為に走行終了時のバッテリーに蓄えられている電氣的エネルギー量は走行開始時と一致しないため、これを初期状態に戻したとした時に必要となるエネルギー量を燃料消費量に換算し、走行燃費を算出した。また、今回新たに CGT からの NO_x 排出量の推定もあわせて行ったので、その方法について以下に説明する。

2.4 CGT からの NO_x 排出量の推定方法

CGT からの排出ガス特性については、文献(3)にも述べられているように予蒸発予混合希薄燃焼方式の採用により CO、HC についてはガソリン乗用車用に定められた厳しい排気規制値に比べてもまったく問題ないレベルであることがわかっているものであらためて比較する必要はないと判断し、ディーゼルエンジンで現在対策に苦慮している NO_x 排出量のみについて推定することとした。ところで、CGT 実機エンジンに於ける詳細な排気ガス排出特性の実験データは全運転範囲で得られている訳ではないこと、CGT 燃焼器の性能実験に関する報告によれば、1) 静特性と、過渡状態の特性はほぼ同じであること、2) 実験条件と異なる温度、圧力条件での推定はある程度可能である事が判っていることなどから、次のような方法でモード走行における排気特性を推定した。

- ① 燃焼器単体の代表的な定常性能試験結果をもとに、ある温度、圧力、空気過剰率における NO_x のエミッションインデックス $EI : [NO_x]_{ref}$ を求める。ここでは文献(3)のデータを参考とした。ここに、 EI ：燃料 1 kg 当たりの排出ガス量 (g)
- ② 圧力 P 、温度 T の条件の違う場合の EI は次の形式の実験式により推定する。

$$[NO_x] = [NO_x]_{ref} \cdot (P/P_{ref})^m \cdot \exp \{k(T - T_{ref})\}$$

$$[NO_x]_{ref} = a \cdot \lambda^b$$

ここに、 λ ：空気過剰率、 a, b, m, k ：実験により決定される定数。

CGT の運転点が決まれば、その点での回転数、空気流量、圧力、温度、出力、燃料流量等は、その静特性から求められるので、これらのデータをもとに、②の実験式を用いて任意の運転点の $[NO_x]$ を算定する。

3. 結果と考察

以上の方法により、バッテリーの初期放電深度 (DOD) を 40% とし、バス実走行モードを 1 サイクル走行させた場合を計算させたところ、前報の 10—15 モードの場合と比較して走行燃費は大幅に悪化した。各コンポーネントの作動点を検討したところ、走行モードの違いにより低速走行が増加し、加減速がきつくなった為に、特に

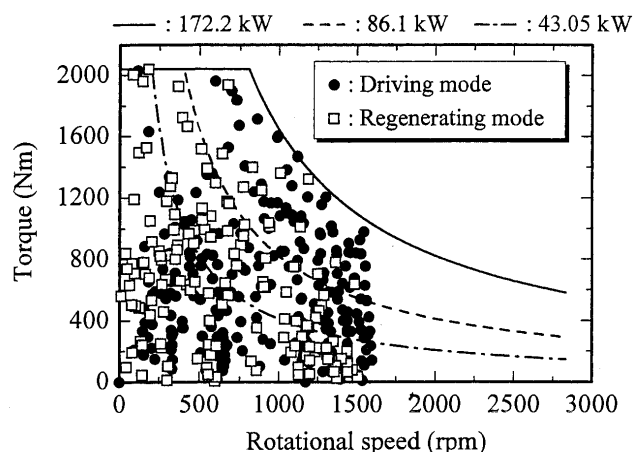


図3 モータの作動点 (駆動および回生)

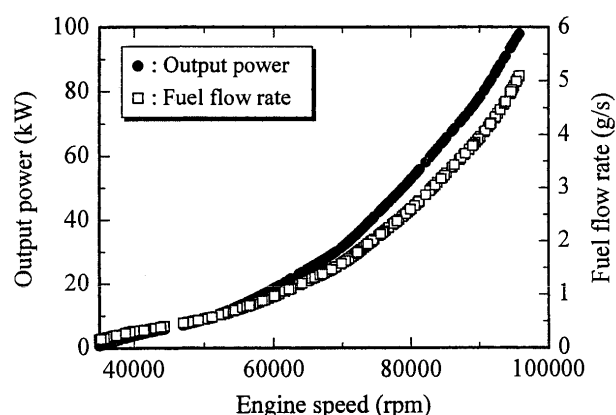


図4 CGTの作動点性能

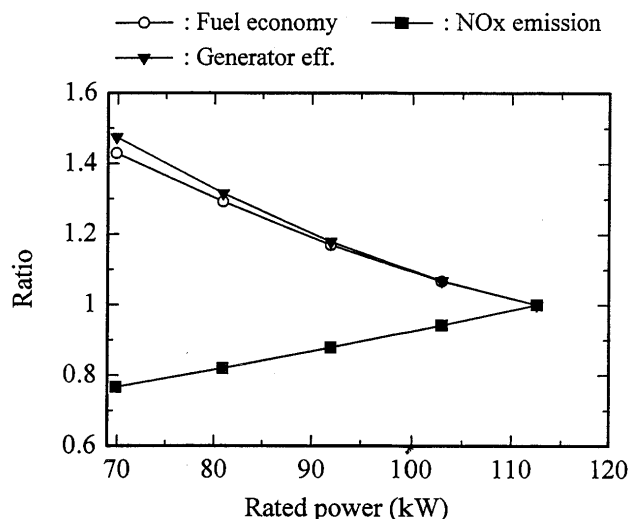


図5 CGT小容量化の効果

テリ容量を変えずに、車両がバス実走行モードを走行できることを条件に、CGTを小容量化した場合の走行燃費およびNOx排出量への影響を調べた。なお、CGT特性は小型化すると効率等も幾分低下するが、ここでは空気流量のみが減少するとして扱った。結果を図5に示す。CGT容量が70 kW (全容量の25.4%) の場合、走行燃費は約43% 向上し、NOx排出量は23% 低減することが判った。また、図5の▼印は走行期間中の発電効率算術平均値の向上率を示しているが、この事からも、走行燃費向上の理由は、エンジン/発電機の小容量化により、CGTおよび発電機の負荷率が增大しそれぞれの作動点効率が向上したためであると思われる。なお、CGT容量が70 kW 以下では、走行中に発電機からの供給電力が不足となり、モード走行ができなくなった。

3.2 バッテリー特性の影響

バッテリー容量の増加は、重量増加による悪影響と内部抵抗減少によるプラスの効果とがあり、そのバランスにより最適値が存在する。ベース車両の場合、およそ2700 Ah 程度が良い結果となっている。ところで、バッテリー性能は、一般に出力密度とエネルギー密度で表され、出力密度は最高速度と加速性能に影響するが、走行モードが定められている場合、どの程度の影響があるかを先ず調べた。バッテリーの出力密度をベースの鉛酸バッテリーの現状値200 W/kg から開発中の先進バッテリーの目標値である300 W/kg まで変化させた場合の充・放電効率や回生効率等の変化を検討した。その結果、バッテリー出力密度を1.5 倍に増やすと、走行燃費は約3.5% 向上し、NOx排出量は3.4% 低減した。その理由は出力密度の増加は結局バッテリーの内部抵抗減少であるから、電池の充・放電効率および回生効率が3~4% 向上するためであることが確認された。

次に、出力密度を300 W/kg 一定とし、バッテリー全容量をベースの2700 Ah から減少させ、各種性能パラメータに及ぼす影響を調べたが、バッテリー容量を減らし

モータの作動点が図3に示すように駆動時、回生時ともに効率の悪い低回転、低負荷の領域で作動する頻度が大幅に増加していること、「発電機アシスト」制御モード(後述)の使用頻度が増加していること、バッテリーの放電電流が増大し、放電損失が増加していること等が明らかになった。しかしながらこれらの原因は全て低速、急加減速と言う走行モードに起因していることであり、当然の結果とも言えるが、また逆に、加減速が激しいことは回生可能エネルギーも大きいことでもあるから、減速エネルギーの回生制御や発電機アシスト制御等加減速に関わるシステムの制御方法の影響を念頭に実走行モードにおける走行燃費に対して、システムの最適化を検討した。なお、CGTの運転点は図4に示すように、激しい加減速のあるモードであっても、「発電機アシスト」制御の導入により定常運転線に沿って運転されている事が確認された。

3.1 CGT小容量化の効果検討

今までの著者等の検討結果によれば、CGT/発電機系を小容量化し、負荷率を高めることの有利性が示唆されていたので、あらためて検討を行った。ベース車両におけるエネルギー供給部分の全出力容量は約275 kW であり、その内CGTは113 kW で、全出力容量に対するCGTの占める割合は約41% となっている。そこで、先ずバッ

ていくと内部抵抗の増大効果が、出力密度増による内部抵抗減少効果より勝り、結局電池の充・放電効率と回生効率が悪化し、車両重量は減少するが、走行燃費及び排気性能は逆に悪化することが判った。また、エネルギー密度の向上はバッテリーの軽量化につながるため、ベースの 42 Wh/kg から新型電池で実現可能な 100 Wh/kg まで順次変化させたところ、電池の充・放電効率と回生効率が若干向上し、走行燃費は 3.5% 向上、NOx 排出量は約 3% 低減することが判った。

以上の検討結果により、車両重量の大きな都市内路線バスにおいては、現状で期待できるバッテリー性能向上の程度では、走行燃費と排気特性の改善効果は期待される程大きくないことが判った。

3.2 制御パラメータの影響検討

モード走行ではシステム制御の方法を変えても、モータの作動点は変わらないが、CGT、発電機、バッテリーの作動状況が変わるため、充・放電効率や回生効率、走行燃費、排気特性に影響すると思われる。そこで以下のパラメータについて、その影響を調べた。

(1) バッテリー制御定数の影響

モード走行中にモータが必要とする電力は時々刻々の走行条件で決まるが、この必要な電力はバッテリーまたは発電機から供給され、また両者から一部ずつ供給する場合はどの程度の比率で供給するのかを決定する必要がある。この際、バッテリーが満充電に近い場合には、モータや発電機から回生可能なエネルギーがあってもバッテリーに回収できない等、バッテリー内のエネルギー残量(即ち DOD)を見ながらシステムとして最も効率の良い制御方法を取る必要がある。具体的には、DOD に応じモータの必要電力に対して発電機の発電目標値を時々刻々決める方法を採用し、その比率を表す変数としてバッテリー制御定数 α_d (= 発電機出力目標値/モータ必要駆動電力) を定義し、 α_d を初期設定値の 53% から、車両のモード走行が可能である範囲内で順次増加させその影響を調べた。 α_d を大きくして行くと走行燃費及び NOx 排出量が改善されるが、 α_d が 73% 以上の場合、減速時に発電機アシスト制御が働くと発電機電流が過大となりバッテリーの充電制限電圧(定格電圧の 125% としている)をオーバーし充電出来なくなる場合が生ずることも判った。これはバス実走行モードに於いては、バッテリーの初期 DOD は 40% 以下に設定する必要があることが予備検討の結果判っており、10-15 モードの場合に比べて充電に対する余裕が少なくなっているためと思われる。なお、 α_d が大きくなるにつれ走行燃費等が改善されるのは、前報でも述べたように発電負荷が増大し、CGT 及び発電機の作動点が高効率側に移動すると共に、バッテリーからの放電電流が減少するため、バッテリーでの損失が減少するためである。 α_d の上限を 73% とした場合の初期設定に対する改善効果は走行燃費は約 5%、NOx 排出量は約 9% であった。

(2) 発電機アシスト強度の影響

ガスタービンは大きな加速を必要とする場合、燃料制御だけで行くと一度に多くの燃料が供給され、過温度や圧縮機のサージング等の危険性がある。サージングを避けようとする燃料供給量が制限され目標回転数への追従が困難となる。そのためガスタービンは一般的にレスポンスがレシプロエンジンに比べて劣り、ハイブリッドシステム用の原動機として考えたときに大きな容量のエンジンが必要とされていた。そこで、前報において既に述べたように、CGT にとっては負荷である発電機側の負荷を一時的に増減制御することにより、エンジンの回転数制御の支援を行う「発電機アシスト制御」を考案した。この負荷増減は CGT の目標回転数と実回転数の差に比例させた量を、本来のその時刻における負荷から差し引くことで行う。極端な場合は発電機をモータとして働かせることにより急加速が可能となる。これにより、エンジン回転数が目標回転数に近くなったところで本来の燃料制御に切り替え、エンジンをサージを避けながら素早く加速させることが可能となる。一方、減速の場合は、発電機の負荷を一時的に増やすことになり、回転慣性の大きなガスタービンでも、有効なエンジンプレーキがかけられるため、供給燃料が急減することによるエンジンの吹き消しも起こすことなく、エネルギーを回生してエンジンを急減速させることが可能となる。加減速の激しいバス実走行モードにおいてもこの方式が有効であるかどうかを確認した。バッテリー制御定数 α_d を 70% 一定として、発電機アシストの強度を徐々に増大させ、その影響を調べた。発電機アシストの強度を強くして行くにつれ、走行燃費、排気特性ともに良くなるが、その理由は発電機アシスト強度の増大とともに発電機出力が大きくなり、発電機の作動点が高効率側に移り、発電機効率が向上したためと思われる。しかしある値以上に強くすると、やはり減速時に発電機電流が過大となり充電出来なくなる場合が発生することが判った。この限界以内での初期設定値に対する改善効果は、走行燃費および NOx 排出量ともに約 2% であった。

以上の検討結果より、制御パラメータの調整による最適化は、バッテリーの初期 DOD とも関係するが、発電機電流が過大とならない範囲で、バッテリー制御定数 α_d を出来るだけ高く選定し、発電機アシスト強度を大きく設定した方がより効果的であることが示唆された。

3.3 CGT を用いたハイブリッドシステム最適化による走行燃費および NOx 排出量の改善効果

以上の検討結果により、ベースシステムを出発点として最適化の方向を検討し各パラメータを設定した。表 2 に結果を示す。主な変更点は、CGT/発電機系量を約 64% 程度に小型化したこと、バッテリーの特性として先進バッテリーの開発目標値を参考にエネルギー密度を 42 から 100 Wh/kg に、出力密度を 200 から 300 W/kg としたこと、システム制御のうち発電機アシストの強度を

表2 ベースシステムの最適化の詳細

項 目	単 位	ベース	最適化
エンジン形式		CGT	←
最大出力	kW	113	70
最高回転数	rpm	100000	←
発電機形式		PM	←
出力 (定格/最大)	kW	50/100	32/64
回転数 (定格/最高)	rpm	6000/10000	←
モータ形式		PM	←
出力 (定格/最大)	kW	86.1/172.2	←
回転数 (定格/最高)	rpm	1063/2834	←
電池形式		Lead-Acid	
エネルギー密度	Wh/kg	42	100
出力密度	W/kg	200	300
バッテリー制御定数	%	70	←
発電機アシスト強度		1	1.9
走行燃費	km/l	3.17	5.01
NO _x 排出量	g/km	0.98	0.69

高めたことである。その結果、ベース車両に対して走行燃費は約60%向上し、NO_x排出量は30%低減することが判った。この値を、ベース車両とほぼ同じ車体でかつほぼ同じ最大出力のディーゼルエンジン搭載路線バスの計算結果⁽⁴⁾(走行燃費:1.8km/l, NO_x排出量:19.7g/km)と比較して見る。そもそも駆動システムの異なる車両の性能を比較する際、駆動系のトルク特性が異なるから両者の走行性能を同じにすることはできず、どのような条件で比較すべきかの判断は大変難しい。この場合も車両総重量が約10%重くなっているため最高速度、登坂速度等の走行性能は多少劣るが低速加速性能は良いなどの面もあり、「同じ乗車定員でバス実走行モードを支障なく走ることができる」ならば走行性能に多少差があったとしても特に問題はないと判断し現行車両と比較した。走行燃費は約2.7倍、NO_x排出量は1/28以下に相当する値であって、現行ディーゼル車に比べて大幅な改善効果が期待されることが判った。走行燃費向上の寄与率について内訳を分析してみると、CGTによるハイブリッド化により1.76倍(制動エネルギー回生分で約42%増、エンジン性能の違いによる分がさらに約24%増)、ハイブリッドシステム全体の最適化によりさらに1.58倍(CGTエンジン小型化分43%、制御システム最適化分7%、バッテリー性能向上分7%、その他)改善されている。また、以上の検討とは別に、アイドルストップの走行燃費に対する効果を検討するため、バス実走行モードに於けるエンジンのアイドル時間およびその間に消費した燃料量を計算したところ、エンジンの全消費燃料量の約11%で、アイドルストップによる燃料の節約効果は約11%と推定される事が判った。

4. まとめ

CGTを用いた都市バス用シリーズ式ハイブリッドエンジンシステムの最適化を目的に、シミュレーションプログラムを開発し、その主要要素のモード運転時の作動状況を検討し、走行燃費、NO_x排気特性に及ぼす各種パラメータの影響を調べた。その結果、次のことがわかった。

- (1) 定格点での発電効率が40%程度のCGTを用いたシリーズ式ハイブリッドシステムの場合、バス実走行モードに於ける走行燃費は、ディーゼルバスと比べ約2.7倍、NO_x排気量は約1/28の値が得られ、圧倒的に優れた特性が期待できる。
- (2) 走行モードにより走行燃費は大きく影響される。最終的なシステムの最適化に当たっては実際の走行状態に出来るだけ近い走行モードにて行う必要がある。
- (3) 慣性モーメントの大きなガスタービンであっても、発電機の負荷制御により加減速を補助する「発電機アシスト」システムの導入により、バス実走行モードにおいても最良燃費の定常運転線を作動させることが可能であることが確認できた。
- (4) ガスタービンはレシプロエンジンと異なり、最良燃費点が定格点にきわめて近いため、出力容量の小さなエンジンを搭載することが可能で、その効果は大きい。
- (5) 乗用車と違い、車両重量の大きい都市バスに於いては、バッテリーの性能向上はそれほど大きな効果は望めない。
- (6) シリーズ式ハイブリッドシステムではシステム制御の最適化は重要で、出来るだけ発電負荷を高くして発電効率を上げるとともに、発電した電気エネルギーは出来るだけ電池に溜めずに直接モータで使うことを可能とするシステム制御方法が肝要である。
- (7) 減速エネルギーに対する回生効率は70%程度であったが、その損失の主なものはモータの損失とバッテリーの充電損失であった。モータの効率向上が効果があり望まれる。
- (8) バス実走行モードでは、アイドルストップ制御の導入によるさらなる燃費の改善は約11%と推定される。

参考文献

- (1) 伊藤高根他：日本ガスタービン学会誌, Vol. 23(1996), No. 92, p 27
- (2) 伊藤高根, 呉英毅：日本ガスタービン学会誌, Vol. 26 (1998), No. 102, p 67
- (3) 佐々木正史：日本ガスタービン学会誌, Vol. 25(1997), No. 98, p 25
- (4) 財石油産業活性化センタ：自動車用CGTの社会適合性に関する報告書, 1996.3



1999 年国際ガスタービン会議 神戸大会を終えて

組織委員会委員長 有賀 一郎^{*1}

ARIGA Ichiro

1999 年国際ガスタービン会議神戸大会は昨年 11 月 14 日から 11 月 19 日までの間、神戸国際会議場で講演会が、神戸国際展示場で展示会がそれぞれ開催されました。また、最終日には 2 班に分かれてのガスタービン関連企業などを中心とした見学会が実施されました。わが国で開かれるこの国際会議は 1971 年以来、7 回目、幹事学会、(社)日本ガスタービン学会に加え、次の内外 8 学会

Associazione Termotecnica Italiana
Société Française des Mécaniciens
Société Française des Termiciens
The Chinese Society for Engineering Thermophysics
The Institution of Mechanical Engineers
The Japan Society of Mechanical Engineers
The Korean Society of Mechanical Engineers
Verein Deutscher Ingenieure

を Collaborating Societies とし、その他、21 団体の協力の下で行われ、多数の参加者を得て、盛会裏に無事終了したことをご報告申し上げます。

今回の国際会議については、1996 年以来、日本ガスタービン学会の国際交流委員会および理事会などで審議を重ね、神戸開催を決定しました。当初、関西地区以外からの参加者の予測が立ち難いこと、学会と実施地とに 2 極化することは、準備作業が繁雑になり、また、過去の経験が新しい地区にどの程度活用できるかなどの懸念もありましたが、是非関西で開こうとの熱意に加え、開催受入れ態勢をあらゆる角度から検討した結果、その方針で進むことが確定しました。そして 1998 年 4 月に第 1 回組織委員会が開かれ、正式に会議の準備に入りました。実務は実行委員会が設けられ、総務、論文、行事、財務、展示などを分担して具体化が進められました。上述のような問題点に対処するため、実行委員会の組織の簡素化が図られ、基本方針の相互関係を取りつつ各部門で個別業務を決定する態勢にして、情報伝達システムも工夫し、各部門に迅速に周知させる機能を設けました。今回は経費面で企業からの援助を仰ぐことは避けましたので、必然的に登録費収入への依存度が高くなり、登録者数の増減が収入経費を左右することになりましたが、

幸い各関係者のご理解を得て、約 600 名というこれ迄で最も多数の方に参加登録をしていただきました。経費面では、これに加え幾つかの諸団体から助成を受けることができ、支障なく運営することができましたことに改めてお礼を申し上げます。会議の中心をなす講演も発表件数 145 と 6 件のキーノートスピーチが計 4 室で実施され、いずれも熱心に発表、討論が行われ、参加者に有益な情報を提供できました。一方、ガスタービン、ターボ過給機および関連技術の展示会が参加企業 43 社で開かれ、2500 名以上の見学者に最新技術の動向を目の当たりにご覧いただきました。

この国際会議では、いくつかの新しい試みが行われ、所期の成果を挙げることができました。とくに準備組織の運営形態や情報伝達方法で、今後の参考になる貴重な経験を得たと思います。ただ実行委員会や準備に携わった委員の方々の負担は矢張り相当なものと思われ、業務に支障のない範囲でできる限り省力化を図ることがなお残された課題と考えます。また、海外参加者は 100 名近くで現在の経済環境では一応満足する人数とは思いますが、その中には常連の方も多く、今後はそれに加え、新規メンバーにも是非参加していただけるような方策を講じたいものです。そのためには、この会議の PR を海外に広く、継続的に行うことと特徴ある性格づけも大切でしょう。今回も International Advisory Committee のメンバーに協力していただきましたが、会議期間中にも会合を開き、貴重な意見をお聞きました。これらの方を通じ定期的に情報交換を続ける活動も有効と思われます。

さて、第 2 の産業革命期と云われる 20 世紀を支えた多くの技術革新は人類文明を豊かにする上で幾多の恩恵をもたらしたことは事実であります。同時に深刻な負の遺産とも云われる数々の問題点が派生したことも否定できません。環境問題やエネルギー資源の枯渇化もその例であります。一方、現代社会を維持するためには、エネルギー利用は不可欠であり、環境改善を図りつつ、その有効利用を目指すことがこれからのエネルギー利用技術を開発する上で極めて肝要であります。ガスタービンはこういった時代の要請に応え、低公害、高性能化への途を力強く歩み続けており、今回の国際会議でもそれが強く印象づけられました。そしてこの会議での成果がガ

原稿受付 2000 年 2 月 8 日

* 1 千葉工業大学 工学部 機械工学科

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

スタービン、ターボ過給機に関連した技術を 21 世紀に継承し、さらに発展させるための掛橋となりますことを切に願うものであります。

終りに、この会議の準備運営に終始尽力された実行委員はじめ関係者の皆様に感謝すると同時に(株)日本ガス

タービン学会および多くの学協会、諸団体のご支援に心より謝意を表するものであります。そしてこの会議にご参加いただいた皆様には改めて組織委員会としてお礼を申し上げる次第です。



1999 年国際ガスタービン会議報告 全 般

実行委員会委員長 葉山 眞治*¹
HAYAMA Shinji

1. はじめに

1999 年国際ガスタービン会議神戸大会が神戸国際会議場で 11 月 14 日から 19 日まで開催された。この会議は本邦において 7 回目であり、京浜地区以外で開催された最初の国際会議であった。初日の Welcome Reception から始まり、続く 4 日間は研究発表講演会で、最終日は 2 件の Plant Tour が行われ、いずれも盛会裏に終了した。以下、準備から終了までの概要について報告する。

2. 国際交流委員会での検討

前回 1995 年の横浜大会において発足した International Advisory Committee (以下 IAC と略記) が契機となって、IAC メンバーと連絡を保ち、次期国際会議の準備を行い、さらに海外との交流を推進していくために、第 21 期より本学会内に国際交流委員会が発足した(6 章参照)。

国際交流委員会では 1999 年の国際会議への対応として、東京、横浜、名古屋、京都および神戸の会場を調査した。折から我が国の経済環境は極度に厳しく、従来のように賛助会員から特別賛助会費をいただくことは断念せざるを得ない状況にあり、経費を節減して開催することが主要な課題であった。京浜地区以外で会議を開催したとき参加者および展示出展社を従来通りに確保できるか大いに危惧されたが、関西地区の多くの方々から暖かい協力の申し出があり、最終的な候補地を神戸国際会議場と決め 1997 年 4 月の理事会に提案したところ、異議なく承認され神戸開催が決まった。

国際交流委員会の発足により従来の次期国際会議開催検討委員会は不要となり、次の準備委員会に準備状況を円滑に引き継ぐことができた。

3. 準備委員会

第 1 回準備委員会は 1997 年 7 月 1 日に神戸国際会議場で開催され、本国際会議の準備に当たり次の 8 項目の基本方針が確認された。(1)賛助会員に拠出をお願いしてきた特別賛助会費の廃止、(2)総合事務局の廃止、(3)通信手段の活用による実行委員会のスリム化と部門委員会へ

の各種決定権の委譲、(4)全論文査読制の採用、(5)招待講演の充実、(6)Circular の簡素化、(7)通信手段の活用とホームページによる広報の充実、(8)IAC メンバーの活用。

これらの基本方針に沿って学会としての会議の準備に入り、従来までの呼称に倣って会議の名称を 1999 年国際ガスタービン会議神戸大会 (1999 Kobe International Gas Turbine Congress, 略称 1999 KIGTC) とし、開催規模・形式は前回の横浜大会と同等と決めた。会議の開催期間については IAC メンバーの意見を参考にするとともに、他の関連国際会議と重ならない時期として 1999 年 11 月 14 日から 19 日に決定した。経費節減のため業者委託の総合事務局は置かず、論文関係のとりまとめは論文委員会で行い、参加登録・印刷物の発送および連絡業務は国際会議の業務に慣れた業者に依頼し、展示・行事関係は専門の業者に委託することとした。また、開催の準備、運営は従来通り学会から独立した組織である組織委員会が主体的に行うこととした。本学会は従来通り幹事学会として組織委員会を直接支援するが、実質的な主催者ではないとの立場をとることとした。

日本機械学会には従来通り共催学会として協力をお願いした。また、海外からの論文の応募、参加の呼びかけについて海外の関連学会に協力を呼びかけた。その結果、日本機械学会をはじめとし、英国の IMechE、フランスの S.F.M.と S.F.T., ドイツの VDI, イタリアの ATI-CST, 中国の CSET, 韓国の KSME の 8 学会の協力が得られることになった。

Announcement は会議の開催場所、開催期間、行事・展示の概要、論文関係の日程を明示して 1997 年 11 月に発行された。また、第 1 回準備委員会で決めた国際会議の英文名称はテンポラリな会議の印象を与える恐れがあるので、International Gas Turbine Congress 1999 Kobe (略称 IGTC '99 Kobe) に変更した。

組織委員会のメンバーについては実行委員との重複を避け、各企業、研究機関等からは参加と論文提出の勧誘に実質的に動ける人に依頼することとして、最終的に 87 名をお願いした。今回は関西地区で会議が開催されることも考慮して実行委員会をスリム化して開催頻度を減らし、副委員長を本学会とのパイプ役にして連絡を密にするようにした。予算に関しては特別賛助会費を廃止したので 10% 程度の支出削減に努力し、補助金の申請

原稿受付 2000 年 2 月 3 日

* 1 富山県立大学 工学部 機械システム工学科
〒939-0398 富山県小杉町黒河

に力を入れることとした。また、会議開催に向けた作業を組織委員会・実行委員会に引き継ぐに当たって、それらの発足後なるべく早く 1st Circular を発行できるようにその原稿の作成、印刷の準備を行った。さらに、組織委員会の発足のために、各組織委員に就任の確認と委嘱状の発行を行うとともに、設立趣意書、事業計画書、予算案を作成した。

このようにして第 1 回組織委員会は 1998 年 4 月 24 日に日本機械学会会議室で開催され、設立趣意書、事業計画書および予算案は原案通りに承認され、国際会議は開催に向けて本格的にスタートした。同時に学会内の準備委員会は組織委員会の発足でその役割を終え、国際会議の準備作業は学会の手から離れた。(慶應大 川口修記)

4. 実行委員会

第 1 回組織委員会において、組織委員会の事業を達成するために具体的な準備、実施、運営にあたる実行委員会を設立することが有賀組織委員長より提案され、葉山実行委員長、川口副委員長および総務、財務、論文、展示、行事各委員会の委員長、幹事からなる実行委員会構成員が承認された。今回は組織の簡素化を計るため原則として各委員会が自主的に担当分野の企画、検討、実施を行うこととし、実行委員会は各委員会間の調整の場として位置づけられた。以下に各委員会での準備状況を述べる。なお、論文および展示関係は別掲があるので省略する。

4.1 総務委員会

既に述べたように、今回の実行委員会の組織、運営上の特徴は、できるだけ組織を簡素化し余分な出費を避けるため、従来のような総合事務局を外部業者に委託することはせず、各委員会毎に独立して作業を進め必要最小限の業務を外部業者に依頼するという形態をとったことである。全体の組織を図 1 に示す。総務委員会の主要業務は、この国際会議の存在を広く外部に宣伝し、できるだけ多くの参加者、特に海外からの参加者を集めること

である。そこで国際会議に経験の豊富な(株)インターグループに登録管理業務と海外連絡窓口を依頼し、行事参加やホテル予約等の業務を(株)全国観光に、Circular 等の印刷物の作成を(株)リョーイン印刷に依頼した。具体的業務の進め方としては、先ず初めに総務関連業務を大雑把に洗い出し、それぞれの担当委員を決めて、委員毎に具体的な検討案を作成し、それを主として E メールで情報交換しながら、必要に応じて総務委員会を開催し重要事項を調整しながら進めた。以下に主要な業務の準備状況を述べる。

1) Collaborating Societies の確認 この作業は既に準備委員会の段階より前回横浜大会の実績を基に、依頼の手紙や催促の FAX 等で先方からの確認取り付け作業が進められたが、オーストラリアからは前回同様返信が得られなかった。英国機械学会 (IMechE) については、当方からの送信がはじめに関連の薄い Division に回されたこともあり先方からなかなか返事が得られなかったが、最終的には大槻副委員長のご尽力で英国の知人を介して打診していただいたことにより協力する旨の回答が得られた。ASME との関係はかなり歩み寄りが見られたものの今回も協賛までには至らなかった。最終的には 8 学会より協力をいただいたが、この種の作業はただ単に形式的に相手学会に依頼状を送付しただけでは協賛をいただくことが難しい場合もあり、先方との何らかの個人的つながりが重要である。

2) 各種広報活動 共催、協賛学会等主要な関連学会の会誌に論文募集の広告を出してもらうなどの活動のほか、今回は海外からの参加者を増やす目的から、ガスタービン関係者にはなじみがあり、世界的に発行部数の多い Gas Turbine World 誌への折込広告の掲載を行ったが、掲載料の交渉等が長引き実際に掲載された時期が多少遅れた。実質的な効果がどの程度であったかは定かでないが、やるなら早めに掲載することが肝要である。

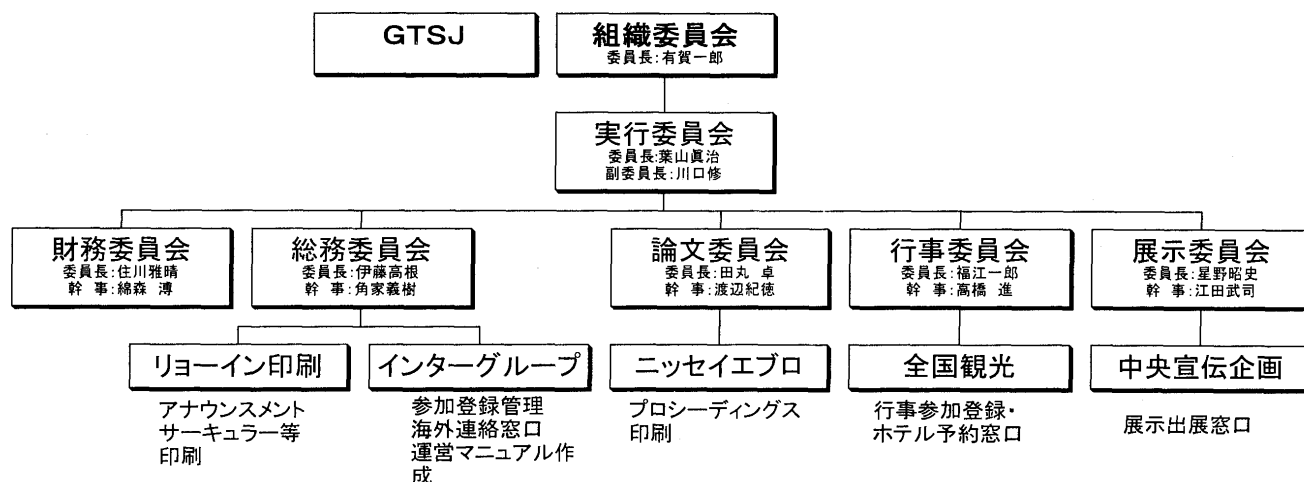


図 1 IGTC '99 Kobe 運営組織

- 3) Circular 類の発行 Circular はできる限り関心を引きつけるデザインとすべく、表紙は開催地神戸の景色をカラー写真で掲載するなどの工夫を凝らした。また形状も A5 版とするなど従来の形式を一新し、第 1 回組織委員会に提案したところ好評であったので以後この形式に統一した。

1st Circular の掲載内容は従来とほぼ同じであるが、論文募集を第一義とし、詳細は今回新たに開設したインターネットのホームページを利用して順次知らせることを前提に編集した。また、発行の時期を重視して準備を進めた。

2nd Circular はこれを見て参加の決心を促すためのものであるから、基調講演や発表論文の内容等会議の全容がほぼ確定した情報を提供した。内容もさることながら発行の時期も重要であるとの認識で準備を進めたが、最も重要な論文関係の原稿収集、校正が期日通りに行かず（今回から全論文にて採否を決定することとしたため時間的余裕が取れなかった）、発行が予定より多少遅れた。また、従来は 3rd Circular を発行していたが、インターネットで最新情報を伝えることとし、今回は省略した。

- 4) Program の発行 当日受付にて参加者に配布し、最終的な情報を提供することを目的に準備を進めた。また、従来各種案内資料において主催者側の顔が見えないとの声もあったため、組織委員長と実行委員長連名のメッセージに顔写真をつけて温かみのある掲載内容とした。また、各種補助金をご援助いただいた団体名も新たに共催、協賛学会名と同様に掲載した。
- 5) 各種補助金の確保 今回の国際会議を神戸で開催した一つの理由に、神戸では比較的多額の補助金を出す制度を用意していることがあげられる。賛助会員からの特別賛助会費を当てにすることなく、経費発生も最大限抑える努力をして何とか成り立つようにすることが当初の計画であり、その計画に従ってポートピア 81 記念財団および中内力記念財団への補助金申請を行った。幸い海外からの参加者が 100 名以上期待できたのでその旨申請書に明示して特別割増金の給付も得られた。

準備段階最大の難問はこの経済状況の中で「どの程度の参加者があるか」の読みがなかなかできず、一応 400 名と見積もり検討を進めた。いかに経費を節約しても収支が極めて厳しい状況が予測されたので、学会役員の方々からの口添えをいただいてガスタービンに特に関連の深い電気事業連合会とガス協会に関係者が出向いて国際会議の趣旨および現況の説明を行った。その努力のかいあって各協会のご理解をいただくとともに多額の寄付金を頂戴することができた。そのほか会員の 1 人から寄せられた情報により新たにスズキ財団からも寄付をいただくことができた。

- 6) 参加者の勧誘 事前申し込みの最終期限は 1999 年 9

月 30 日であった。この日を一応の目安としていたが楽観を許さぬ数字であったため、その後も参加申し込み人数を連日確認するとともに横浜大会の参加者人数、関西地区での開催、今年度の経済状況等を勘案し、企業別参加人数予測等を行いながら、関係者を通じてさらに参加の呼びかけを行った。これには本学会および会員の一部の方々にも多大なご協力をいただいた。最終的には 600 名を越える過去最大の参加人数を数えることができた。

- 7) 第 2 回組織委員会 第 2 回組織委員会は 1999 年 11 月 5 日に神戸国際会議場で開催され、その間に申し出のあった委員の交代、修正予算案の提案などがあり、いずれも異議なく承認された。また、各委員会からそれまでの作業状況とその後の方針が詳細に説明され、確認された。最後に論文発表の場となる会場の視察が行われた。（東海大 伊藤高根記）

4.2 行事委員会

行事関係では従来通り Welcome Reception, Accompanying Persons' Program, Banquet, Plant Tour を開催することとし、Reception, Banquet の内容、会場の検討、Accompanying Persons' Program, Plant Tour のコース、見学先の検討を行った。

Welcome Reception は参加者の登録手続き場所に近い方が参加し易いとの判断で会議場内のレセプションホールにて開催することとし、Banquet については当初会議場に近しいホテルでの開催を計画したが、神戸の夜景を楽しんで貰いたいとの趣旨で神戸メリケンパークオリエンタルホテルを会場とした。

Plant Tour は三菱重工業高砂製作所内複合発電設備、関西電力姫路第一発電所、姫路城のコースと、川崎重工業明石工場、関西電力尼崎燃料電池発電試験所、明石海峡大橋の二つのコースを設定し、各コースとも観光名所を織り込んだ貸切バスでのツアーとした。

会議開催がちょうど紅葉の時期でもあり、Accompanying Persons' Program は紅葉狩りを兼ねた京都を訪ねるプランとした。

会議開催の直前まで財政面での不安があったので、各行事内容については吟味に吟味を重ね、内容が充実しつつ洗練された無駄の無い計画を目指した。その一つとして Banquet での余興に本学会員による四重奏を計画した。

また、初の関西開催ゆえ、参加人数の予測に困難があった。特に参加者数によって大きな影響を受ける Banquet については予め参加者規模を 2 ケース設定して計画を立案した。（三菱重工業 高橋進記）

5. 会議実施期間中について

5.1 会議実施準備と進行状況

会議場での準備は登録受付前日の 11 月 13 日午後より始め、まずこの日は登録時に渡す Proceedings, Pro-

gram など関連資料の袋詰め作業を行った。会議前日の14日は、午後1時に実行委員、アルバイト、ボランティア、協力業者ら関係者一同65名が3階ロビーに集合し、会議運営のスタートにあたって川口実行副委員長の挨拶と関係者の紹介が行われた。その後、会場の設営、アルバイトおよびボランティアへの登録業務の説明会と登録カウンタの設営、同様に講演会場業務の説明会と会場設営、使用機器の搬入、看板および会場案内板の設置、事務機器の設置などの作業が一斉に行なわれた。

登録カウンタは3階に設置され、運営本部、論文委員会室、VIP室、クロック、アルバイト控室を同じ3階に設営した。講演会場は4室で、3階の国際会議室を主講演会場 Room A とし、4階に Room B、5階に Room C と Room D を設置し、講演者ミーティング室を4階に設けた。

午後4時には準備作業も一段落し、参加者の登録受付が開始された。その後、参加者の登録が順調に進み、午後6時から3階の Reception Hall にて Welcome Reception が開かれた。

11月15日午前9時より Room A にて1999年国際ガスタービン会議神戸大会の幕が開けられた。まず冒頭、有賀組織委員長より Opening Address があり、引き続き今回7名の国内外講師による Keynote Speech の一番手として三菱重工業㈱福江氏の講演が行われた。以後4日間にわたり、午前中は Keynote Speech、午後から研究発表講演会が Organized Session、Technical Session、Panel Discussion の形式で行われ、活発な討論が交わされた。これらの内容については論文関係報告にまとめている。

秋の国際会議シーズンということもあって、当初会場が他の団体の会議との共同使用となることが懸念されたが、幸い貸切り使用となり、会場の混乱もなく順調に会議は進められた。会期中は毎日運営本部にて会議前と会議終了後に実行委員によるミーティングが行われ、当日の予定の確認、一日の反省、問題点の整理を行った。なお、本会議中における総務および論文委員会の実務補助

表1 IGTC '99 Kobe の参加者数

	国内	国外	合計
一般登録	510	83	593
招待者	—	4	4
同伴者	9	9	18
合計	519	96	615
展示会入場者	2559	33	2592
展示会のみ参加者		24	24
総人数	—	120	—

として、実行委員会手配の学生アルバイト、業者手配の一般アルバイトに加え、神戸 SGG クラブ（善意通訳ボランティア団体）からのボランティアの協力を得た。

講演会最終日の11月18日は、Panel Discussion 終了後、葉山実行委員長による Closing Address があり、次回を4年後、京浜地区で開催したいとの予告があつて閉会した。

本会議への登録者数および展示会への入場者数は表1に示す通りで、登録者は600名を越え過去最大であった。海外からの参加者も展示会のみへの参加者も含め120名に達した。初めての京浜地区以外での開催、厳しい経済状況下という事情にも拘わらずこれだけの参加者を迎えたことは喜ばしいことであった。（撰南大 角家義樹記）

5.2 会議期間中の行事

1) Welcome Reception 11月14日、開会の5分前より葉山実行委員長夫妻、有賀組織委員長夫妻、菅日本ガスタービン学会長ほか主催者代表が会場入口にて参加者を出迎え、予定の18時より国際会議場の Reception Hall にて開催された。

辻川委員の司会で歓迎会は進められ、葉山実行委員長による歓迎の挨拶のあと、有賀組織委員長の音頭で一同乾杯をして歓談に入った。和やかに交歓の花が咲いたころ、葉山委員長夫妻に中国の Prof. Jingi、ドイツの Prof. Bohn、米国の Dr. Hah の各氏を加え、賑やかに鏡割りを行った。IGTC '99 Kobe のロゴがプリントされた枡にて樽酒を楽しみ、あるいは神戸市より提供のあったワインに舌鼓を打ちながら国内外あわせ

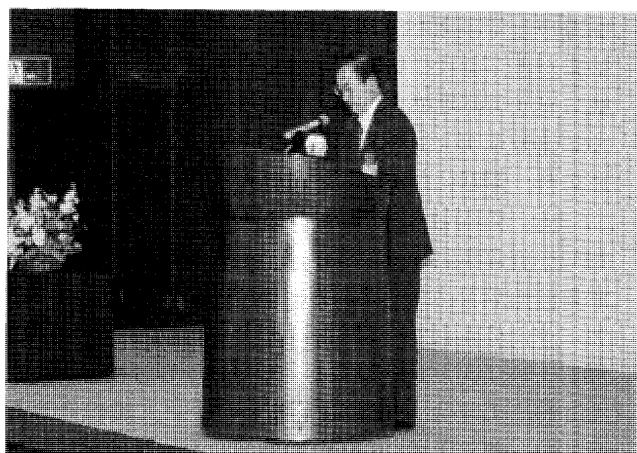


図2 有賀組織委員長の Opening Address



図3 Welcome Reception での鏡割り

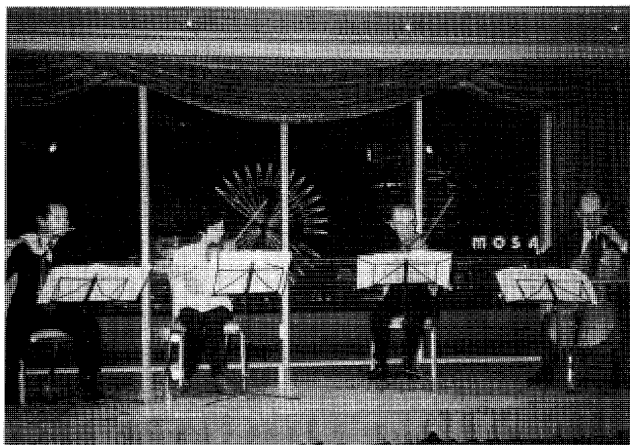


図4 Banquetにおけるフルート四重奏



図5 1,500℃ ガスタービンコンバインド発電設備にて

150 名を越える参加者は楽しいひとときを過ごした。

2) Accompanying Persons' Program 会議の合間の 11 月 16 日、同伴者プログラムとして京都への観光ツアーが催された。外国からの 3 名を含めた計 16 名の参加者を得て、行事委員 2 名と通訳他のスタッフにて運営された。出発地の神戸では秋晴れが期待されたが、あいにく京都に近付くにつれ天候が崩れて雨混じりの天気となってしまったため、予定を変更して雨天用のプログラムを実施した。金閣寺を見学、高雄で紅葉狩りを楽しんだあと昼食に京料理(湯豆腐)を味わったのち、バスにて名所旧跡を周遊しながら、刺繍館(生ハツ橋作成)、西陣織り会館を見学して帰途についた。伝統的な神社仏閣の見学を一部省かざるを得なかったのは残念であったが、つかの間の古都ツアーを楽しんだ。

3) Banquet 各セッションが最高潮となった 11 月 18 日の夕べ、神戸メリケンパークオリエンタルホテル瑞天の間で盛大に開催された。参加者は海外からの 38 名を含めた 125 名となった。今回は神戸市長を来賓として招待するとともに、ゴージャスな雰囲気を持つ会場と香港の夜景に劣らない神戸の夜景が格調高いムードを盛り上げてくれた。

宴は橋本、杉本各委員の司会のもと、有賀組織委員長、菅日本ガスタービン学会長、井上日本機械学会理事の挨拶、そして来賓の杉田神戸市収入役より神戸市長の挨拶が披露され、それに引続いて葉山実行委員長の音頭で乾杯をして始った。会場には 8 名程度ずつの円卓が設けられ、それぞれ話に花が咲いた。宴もたけなわの頃、海外協力学会関係者の Prof. Chen, Dr. Wisler のスピーチ、また、Prof. Rautenberg のスピーチが Prof. Bohn によって代読され、本会議への期待が述べられた。また、今回、特別の余興として演奏していただいた摂南大学角家先生、東京理科大学酒井先生夫妻、電中研佐藤氏ら学会員によるモーツァルトのフルート四重奏(ハ長調第 1 楽章)が素晴らしく、参加者の大喝采を浴びた。

福江行事委員長の挨拶にて終宴となったが、和やかな楽しい Banquet として好評であった。

4) Plant Tour 本会議の最終日の 11 月 19 日に Plant Tour が 2 コースに分かれて実施された。

TourA には外国からの 10 名を含めた 44 名の参加者があった。まず、三菱重工業高砂製作所を訪問し、今岡副所長よりの挨拶並びに工場紹介を受けたあと、世界で初めて実運用されている 1,500℃ 級 501 G 型ガスタービンを採用したコンバインド発電設備を見学した。運転中のガスタービン、蒸気タービン、排ガスボイラ、空冷復水器、中央制御室を 2 班に別れて懇切に案内していただいた。世界初の 1,500℃ 級ガスタービンの運用機であることより、見学者より活発な質問がなされた。

早目の昼食を採ったあと、次の見学先である関西電力姫路第一発電所に向かった。姫路第一発電所では小林所長よりの挨拶、プラントの紹介を受けたのち、1995 年より運転されている 1,300℃ 級ガスタービンを用いた多軸式コンバインドサイクル発電所(5 号機及び 6 号機)を 3 班に別れ順次丁寧な説明を受けながら見学した。プラントは当日も順調な運転が行われており、参加者より活発な質問が出されていた。また、コンバインドプラントシミュレータでは実際に参加者にボタンを押して一部の機能をデモンストレーションさせていただき、より一層興味深いものとなった。その後、真っ盛りの紅葉の中に映える世界遺産に登録されている姫路城をボランティアの要領を得たガイドで楽しんだのち、帰路についた。

一方、TourB には 35 名が参加し、まず、関西電力尼崎燃料電池試験所に向かい、熔融炭酸塩タイプの燃料電池施設を訪れ、所長の技術説明を受けたあと 3 グループに分かれて所内を見学した。次に、川崎重工業明石工場に向かい、昼食後会社紹介のビデオを見ながら一服したあと、産業用ガスタービン工場の見学を行った。組立工場、2 MW の蒸気注入型ガスタービン発電所、300 kW セラミックガスタービンの運転設備

などを見学した。

明石海峡大橋の「橋の科学館」で大橋建設の際の資料を見学し、大橋を渡って淡路島側に渡ったあと、夕闇せまる対岸の神戸の景色を鑑賞した。大橋は予定通り夕刻5時に虹色にイルミネーションされ、その夜景に映える美しい姿に心を残しながら帰途についた。

これらプラントの見学では各見学先のご理解とご協力が得られたことに感謝し、紙面を借りてここに厚くお礼を申し上げる。行事に関しては当初の企画通り無事行われたが、これもひとえに各担当者の尽力に負うところ大であった。(三菱重工業 高橋進記)

6. International Advisory Committee の開催

前回の横浜大会の準備段階において、国際会議への海外からの参加、論文発表を増やすために、これまでの国際会議に積極的に参加してきた研究者、技術者のうちで影響力の大きい人たちに依頼してIACを作り、Circularの配布、学会等を通じた海外の関係者への呼びかけを依頼した。そして会議中にメンバーと組織委員会、実行委員会の役員が意見交換の場を持ち種々の貴重なコメントをいただいた。その後、学会の国際活動を日常的に推進するために学会内に国際交流委員会が発足したため、IACはその下部組織という位置づけに変わった。そしてその役割も国際会議の活性化のためということだけでなく、学会の国際化を推進するという一層拡大した役割を持つことになったため、メンバーの数を増やし、メンバーの関係領域も拡大することとなった。

今回の国際会議の開催にあたって国際交流委員会は、国際会議に参加しているIACメンバーに学会としての国際交流のあり方、国際会議の内容、運営方法について意見を聞くために国際会議の開催期間中に会議場に隣接したホテル内において会合を持った。この会合には国際交流委員会のメンバーの他に、国際会議組織委員会、実行委員会の委員長、副委員長他の主要メンバーも出席した。IACメンバーからは、国際会議が滞りなく運営されたこと、招待講演を充実させたことを評価する声が出されたが、参加登録者が併せて開催された展示会に余裕を持って出かけることができるように講演会のスケジュールに余裕を持たせて欲しいこと、さらに海外からの参加者を増やす努力をすべきであること、など活発な意見が出された。また、最近の国際会議で盛んに行われているProceedingsのCD-ROM化については、複数のメンバーから反対の声が出された。席上何れのメンバーからも積極的、協力的な意見が出されたことから、今後もIACの活用が期待される。しかし、現役で活躍し影響力のある人に協力して貰うためにメンバーの任期制など定期的にメンバーの入れ替え、見直しを行うことも必要であろう。(慶應大学 川口修記)

7. 資料の整理と次期国際会議への引継書

実行委員会における諸準備を進めるに際し、以前の国際会議開催準備に費やされた先人の努力、工夫は大変参考になる。しかしながら、前回横浜大会の資料を調べようとしても散逸しており、これを探し出すのに時間がかかることも入手できないものもあった。今回は業者に一括委託する従来の方式と異なり、業者には内容に応じて個別に依頼し、できるだけ実行委員側で対処することとしたため、実行委員の作業量は膨大であったが、貴重な経験にもなった。このような経緯から、次回以後の国際会議開催のための指針としての引継書を作ることとし、資料を整理し、散逸しないようにCD-ROM化して保存することとした。初めての試みでもあるため、同じ内容の原紙のファイリングも行った。

CD-ROM化するに際して注意した点は、今回の実績スケジュールに基づき、次回国際会議の準備に際して、どの時点で何をすればよいかをスケジュール上に明示し、その時の資料は何を見ればよいかを引き出せるようにした点にある。また、主要アイテムごとの検索もできるようにした。委嘱状、案内状、招待状などは日付、宛先、発信者名を変更するだけでほとんどそのまま流用できる。運営マニュアル、キャッシュフローなども一部分修正、数字を入れ替えることでその体裁、記載事項、フォームは再利用することができる。また、今回の反省事項を盛り込むとともに、予測された困難とそれをどのようにして乗り越えたかも記録に残すようにした。この引継書は今回の実行委員ならびに学会事務局に保管されるので、次回国際会議の準備にぜひ活用していただきたい。(東芝 鳥井晃臣記)

8. おわりに

以上、各担当委員から詳細に報告されているように、今回の国際ガスタービン会議は厳しい財政状況のもと、京浜地区を離れて神戸で開催することになり、参加者および展示出展社を従来と同じように確保できるか、未知数のまま準備を進めることとなった。経費節減が重要な課題であり、業者による総合事務局を置かず、各委員会へ決定権を委譲し、実行委員会をスリム化して各委員会間の調整の場と位置付けた。電子メールによる通信手段をフルに活用して委員会の回数も従来より少なくて済んだ。その代わり、各委員会の負担は従来より増加したが、委員各位の献身的なご協力により、無事開会まで漕ぎ着けることができた。これまで7回開催された国際会議の中で最大の参加者があり、文字通り盛会裏に終了することができてほっとしていると同時に、委員各位の努力が報いられて大変うれしく思っている。景気が低迷している中でこれほど多くの参加者があったことは、関係者の参加勧誘の努力もさることながら、ガスタービンが21世紀に向けて、環境に優しい原動機としてさらなる発展が期待されているからであろう。次回2003年の開

催準備がやがて始まることになるが、今回の貴重な経験やノウ・ハウを CD-ROM 化して引継書として残すことにしたので、次回の準備に際して是非参考にしてほしい。

終わりに、この国際会議を支えて下さった個人会員、賛助会員の方々をはじめ、会議への参加者、展示出展各社の方々、さらに財政的援助をいただいた各団体の方々、また、会議の実施にご指導、ご協力をいただいた組織委員ならびにご多忙中終始ご尽力いただいた実行委員会、各委員会の皆様に心よりお礼申し上げます。

委員会委員名簿

総務委員会委員

伊藤高根(東海大)、角家義樹(摂南大)、足立幸雄(三菱重工)、池田裕二(神戸大)、一色美博(摂南大)、佐々木直人(日産自)、大黒一豊(川崎重工)、田中孝幸(川崎重工)、鳥井晃臣(東芝)、松本浩史(三菱重工)、光武忠晴(ヤンマー)、吉識晴夫(東京大)

財務委員会委員

住川雅晴(日立)、綿森溥(日立)、安田耕二(日立)

論文委員会委員

田丸卓(航技研)、渡辺紀徳(東京大)、青木素直(三菱重工)、荒木達雄(武蔵工大)、池田裕二(神戸大)、柏原康成(神奈川工大)、辻本良信(大阪大)、土屋利明(東京電力)、中村良也(石川島播磨重工)、橋本雅方(三井造船)、橋本正孝(神戸商船大)、平岡克英(船舶技研)、山本肇(川崎重工)

行事委員会委員

福江一郎(三菱重工)、高橋進(三菱重工)、植草久雄(荏原製作所)、宇土剛彰(関西電力)、大庭康二(日立造船)、木下茂樹(ダイハツ)、杉村章二郎(三井造船)、杉本隆雄(川崎重工)、辻川吉春(大阪府立大)、中野博文(ヤンマー)、橋本正孝(神戸商船大)

展示委員会委員

星野昭史(川崎重工)、江田武司(川崎重工)、飯島久(荏原製作所)、岩井益美(トヨタ)、大森達郎(東芝)、糸川滋(三井造船)、辻康雄(三菱重工)、寺田栄一(石川島播磨重工)、清野隆正(日立)、西原昭義(ヤンマー)



1999 年国際ガスタービン会議報告 論文 関 係

論文委員会委員長 田丸 卓^{*1}
TAMARU Takashi

1. はじめに

国際ガスタービン会議が昨年 11 月 14 日から 19 日の期間、神戸国際会議場で行われた。この会議は今回が 7 回目にあたるが前回まではすべて東京／横浜地区で開催されており、関西での開催は今回が初めてである。

会議の内容は、ガスタービンおよびその関連技術に関するもので基調講演 (Keynote Speech) 6 件、6 つの特別分野講演 (Organized Sessions) で合計 31 件、一般技術講演 (Technical Sessions) で 112 件、合計 149 件の講演がなされた。それに加えてパネル討論会が催された。Proceedings には 114 件の一般技術論文が収録されているが、そのうちの 2 件は講演者が出席せず発表が行われていない。

上記 149 件の論文のうち国外からの発表は 12 カ国 54 件である。これを前回 (1995 年) と比較すると、前回が 11 カ国 47 件であったから微増といったところである。全体の発表件数からいうと、1987 年会議が 130 件、1991 年が 122 件、1995 年が 132 件であったので、今回はこれら従前の会議に比べて一段と多い論文発表数であった。なお、前回 (1995 年会議) は論文の申し込みがあり Proceedings に論文収録されながら発表者が現れず発表の無かった論文が 16 件もあった。後述のように今回はそのようなケースを極力避ける対策と努力をしたため、発表者が不参加で発表なしとなったものは 2 件のみにとどまった。

この会議から取り入れた運営手段の 1 つに前回の会議の際に組織された International Advisory Committee (IAC) からの助言を生かした点である。これは日本ガスタービン学会の国際交流委員会 (長島利夫委員長) が組織するもので、日本人の代表委員一人を含む主要参加国からの 14 人の委員から構成される委員会である。国際会議の実行委員会とは別に常置されていて、会議の円滑な運営のための連絡や助言をするものである。

2. 準備経過

今回の国際ガスタービン会議は開催ほぼ 2 年前の 1997 年 7 月 1 日に第 1 回 (実行委員会) 準備委員会が

開催予定場所の神戸国際会議場で開催され、予定開催期日等が決定された。それを受けて同年 11 月 7 日、論文準備委員会が発足した。その委員長は葉山眞治富山大教授、幹事が航空宇宙技術研究所 (以降、航技研) の田丸卓、その他 4 人の委員からなる。

準備委員会 この段階で、前述実行委員会準備委員会で作成した基本方針、すなわち原則的には前回までの国際会議を踏襲するという方針案を確認し、概略論文受理日程・予算案などを決定した。一方、近い将来、ASME (米国機械学会) などとの協力を視野に入れて、会議論文の質の向上をはかるため、論文採用最終審査は全文原稿の審査とすることに決定した。

98 年 1 月には 1st Circular 案を作成した。同年 4 月からは論文委員会事務員として山下真美を採用し、委員増加をはかった本委員会構成の準備と会議内容の検討に入った。

本委員会発足 1998 年 5 月に構成委員 13 名からなる論文委員会が発足した。委員長は田丸、幹事は東京大学渡辺紀徳教授を選任した。神戸での本会議開催の 11 月 14 日までに 14 回の委員会を開催した。

5 月に行われた第 1 回論文委員会では 1st Circular や Gas Turbine World 誌への広告案を審議した。特に 1st Circular に載せる今回の会議の主要トピックスと採用論文分野、論文受理スケジュールなどについて決定した。

今回の主要トピックスは

- (1) Unsteady flow analysis and control
- (2) Advanced materials and coatings
- (3) Ceramic gas turbines
- (4) Advanced combined cycles
- (5) Environmental concerns and emission reduction
- (6) Super/Hypersonic propulsion
- (7) Marine and industrial gas turbine

とした。

会議の構成としては基調講演、上記トピックスを基盤に Organized Session として行う特別分野講演、一般技術講演、それにパネル討論会を行うことにした。前回 95 年の会議では 3 件の基調講演を初日に行ったが、前述 IAC の提案により毎日基調講演を行うことにした。その 6 件のうち 3 件は世界的に著名な研究者／技術者を招待して会議の目玉とする企画とした。

原稿受付 2000 年 2 月 7 日

* 1 航空宇宙技術研究所

〒182-8522 調布市深大寺東町 7-44-1

論文受理スケジュールとしては、

- | | |
|-------------------|----------------|
| (1) アブストラクト締め切り | 98 年 9 月 30 日 |
| (2) 採用通知 | 98 年 11 月 30 日 |
| (3) 校閲用全文原稿受理締め切り | 99 年 3 月 31 日 |
| (4) 最終受理通知 | 99 年 6 月 30 日 |
| (5) 印刷用原稿受理締め切り | 99 年 8 月 31 日 |

とした。

なお、論文委員会の事務局は田丸委員長の勤務地である航技研とし、E-mail や Fax 番号を 1st Circular に表記し、全ての連絡はその事務局を中心に行うことにした。それに伴って実行委員会としてのインターネットホームページとは別に航技研に論文委員会としてのホームページを設け、講演申込者、参加希望者の便宜を図ることとした。

98 年 6 月には外国からの基調講演招待者として、ケンブリッジ大学の Denton 教授と MIT (Massachusetts Institute of Technology) の Greitzer 教授にお引き受けいただけることになった。これらの方々は圧縮機やタービンの分野であるために、3 番目の方として燃焼器関係の元 General Electric 社 (以降、GE 社) の技術者として活躍された Bahr 氏に引き受けていただくことになり、10 月にご了解のご返事をいただいた。

98 年 9 月 30 日の Abstract 締め切り期限前後までに寄せられた申し込みは 100 件程度であった。そこで論文申し込み督促を IAC 委員や実行委員会などの委員を通じて働きかけた。Gas Turbine World 誌に出した広告 (1st Circular) が種々の理由で遅れ 8 月中旬に配布されたことも欧米からの申込が遅れた原因とも考えられる。10 月下旬になっても「申込期限が過ぎているがまだ申し込みめるか」との問い合わせが数件あった。

締め切り後の申し込みが多数あり、最終的に 178 件になった。当初予定論文数は 120~150 件であったため、講演スケジュールの大幅見直しをし、ポスターセッションなども視野に入れることになった。採択通知期限の 11 月 30 日までに全申込者に採択通知を送付した。それらの中には執筆内容をガスタービン技術に特化していただく依頼状添付のものもあった。

その後、99 年の 3 月 (以降、特記無き場合は 99 年) にいたって、実行委員会での審議の結果、ポスターセッション発表論文は講演発表論文と比べ、評価が低く見られがちとの意見が出され、全ての論文を講演発表としてスケジュールを組なおすことになった。

またこの頃、パネル討論会のテーマを時宜に適した環境問題に絡んだものとするに決定した。またその司会を燃焼関係の専門家である Bahr 氏 (招待講演者) と大阪大学香月教授に依頼することにした。

従前と異なり会議開催場所が関西であることから、Proceedings の印刷会社の選定に時間を要した。能力、見積価格などを考慮した上で、最終的に前回までの印刷を依頼している東京のニッセイエブプロ社に依頼すること

にした。今回から採用したカラー図を含む印刷料金も考慮の対象とした。論文中の図のカラー化については最近の CFD (Computer Fluid Dynamics) の出力結果などにおいて要望が多いと予想し、カラー図を入れたことによる超過料金は著者負担を原則に価格設定を行った。

校閲用全文原稿の締切は 3 月 31 日であったが、期日までに送付されてきたものは 30% に満たなかった。送付された各論文はそれぞれ 2 名の校閲者に審査していただいた。前回と異なり刷り上がり 8 ページの全文原稿を 2 ヶ月という比較的短期間に審査しなければならないため、校閲者お一人に審査をお願いした論文数は 3 件以内とした。校閲者は国内ばかりではなく、海外の方にもお願いした。

採用論文は 6 月 18 日に開催した第 10 回論文委員会にて最終決定し、6 月末までに著者にその通知を行った。その際、印刷用の原稿執筆についてのフォームや注意書きを同封し、印刷用原稿の最終締め切りは 8 月 31 日とした。6 月 18 日の委員会決定に間に合わなかった論文は 2 人の校閲者の判断を参考に委員長と幹事が内定し委員会委員に E-mail で了承を求めた。

前回 (1995 年) の時には、Proceedings に論文掲載されていたにも関わらず、発表者が会場に現れずに発表をキャンセルしたものが多くあった。この原因は発表者の VISA (入国査証) 取得が間に合わなくて来日できなかったケースと、何らかの理由で会議に参加しなかった発表者が出たことにある。

VISA 取得は法務省や外務省が関係し、必要書類を来日よりも十分早い時期に提出する必要がある。そのため委員会事務局では VISA が必要となる国の発表者リストを作成し準備した。実際の書類等作成送付作業はインターグループ㈱に依頼したが、受け入れ側の書類作成や実行委員長の印鑑等の処理が予想外に時間を要した。この原因は関連する事務処理、責任者の勤務地などが神戸、富山、東京 (2 カ所) と離れていた点と、国によって外務省出先機関の要求書類、書式が異なっていた点が大い。結果的に VISA 発行が発表者出発のぎりぎりになるケースも出てしまったが、外務省の好意などもあって幸いこの理由で来日が不能となった発表者は出なかった。

その他様々な理由で発表者が不参加となる場合があるがそれを極力防止するために、発表者の参加意志確認の意味を込めて登録料 (Registration fee) を一般の登録者に先立ち 1 ヶ月前、すなわち印刷用原稿提出時と同じ 8 月末までに納入してもらう依頼をした。

3. 講演発表

国際会議場 3 階に設けた受付と同フロアにある国際会議室を A 室、4 階の会議室を B 室、5 階に隣り合っている C 室と D 室を使うことにした。それぞれ 300 人、150 人、5 階が両室ともそれぞれ 100 人規模の部屋である。

以下の講演は基調講演とパネル討論会以外は、上記 4

室の並行セッション、すなわち各部屋の講演が同時進行形で行われる講演スケジュールとした。

3.1 基調講演の概要

外国からの招待講演者である Denton 教授, Greitzer 教授/Wisler 博士および Bahr 氏を含む 6 セッション/7 名の基調講演概要は以下の如くであった。なお, Greitzer 教授の講演は製造の実状を含む内容にしたいとのこと希望で共著の GE 社の Wisler 博士もご招待参加いただき、そのセッションはお二人でのご講演となった。

初日の 15 日は 2 件の基調講演が行われた。最初は三菱重工業(株)の福江一郎氏(写真 1)が「世界的に競争市場にあり環境規制の厳しい状況下における産業用ガスタービン (Industrial Gas turbines in a Globally Competitive Market and Environmental Regulations)」という題で講演された。大型ガスタービンの市場動向について、最近の規制緩和、過当競争等の実状などが説明された。結果として、新機種の開発はもとよりガスタービンビジネス自体が、ガスタービンメーカーにとって、ますますハイリスクになっている事を述べられた。また、このような背景の中で、1999 年からコンバインドプラントの受注が北米市場を中心に急激に伸びており、従来火力に代りガスタービンの需要がますます増えている事を強調された。各メーカーの最新機種の開発状況・性能競争についても言及され、商用ベースの三菱重工の G 型ではタービン入口温度が 1500℃ に達していること、コンバインド発電として同社 H 型ガスタービンが実負荷試運転に世界で初めて成功し、コンバインド効率が 60% LHV に達する見通しを示された。

将来型発電システムとして、効率 70% LHV、タービン入口温度 1700℃ 付近での開発になる予想を述べられた。

引き続き(株)東芝の本間友広氏(写真 2)が「ガスタービンの高温部品の保守と修復技術 (Gas Turbine Hot Parts Maintenance and Repair Technology)」について講演した。この講演ではガスタービン高温部品の余寿命を正確に予測する技術と、これらの部品を補修する最新の技術について紹介した。ガスタービン高温部品の余寿

命評価に対して解析に基づく予測と、定期的な点検記録に基づく寿命予測が推奨され、用いられている。

ガスタービン高温部品は超合金で作られている。しかし材料の劣化は避けられない。そのためガスタービンのノズルは補修されて再使用される。動翼は高温酸化と飛来物の衝突によって損傷を受けるので、一般に補修されないが、損傷が翼先端部に限られる場合は補修される。このような状況から新しい補修技術が開発されており、これらの補修技術が具体的に説明された。

講演の結論として保守管理システムの確立と次世代ガスタービンのため、現在用いられている保守技術の改良を推し進めてゆくには、ユーザとメーカーの協力が不可欠であると強調された。

第 2 日目の 16 日、元 GE 社において航空用ガスタービンの排出低減燃焼器開発を担当し、現在コンサルタントの立場にある D.W.Bahr 氏(写真 3)が講演した。そのタイトルは「ガスタービン燃焼と排出低減技術-現状と予想 (Gas Turbine Combustion and Emission Abatement Technology-Current and Projected Status)」である。

この 20 年間の厳しい排出規制のためガスタービンの NOx 排出低減が実現されてきた。航空エンジンおよび



写真 2 基調講演の本間氏



写真 1 基調講演の福江氏



写真 3 基調講演の Bahr 氏



写真4 基調講演のDenton 教授



写真6 基調講演の伊藤氏



写真5 基調講演のGreitzer 教授と Wisler 博士

産業用ガスタービンの代表的低 NO_x 燃焼器を示し、排出低減の手法を解説した。航空用では温暖化を懸念して巡航時の排出規制も検討されているため産業用と合わせて次世代には更なる低 NO_x 燃焼器が必要となることを述べられた。

第3日目、17日は英国ケンブリッジ大の John D. Denton 教授 (写真4) が「タービンの最新技術と将来 (State of the Art and Future of Turbine Technology)」について講演した。

一次元設計においては損失の評価が問題であるが、そのほかの効率評価や性能改善に影響する要因などについて指摘した。二次元および三次元 NS 計算は日常的に設計に用いられるようになっている。

三次元非定常計算は設計に用いるには時間がかかりすぎるが、変動力の評価以外にも実現に基づく精度の高い損失評価が期待できる。翼の三次元設計も一般化しているが設計に対する一般基準はなく、試行によるものが主体である。いくつかの三次元設計例とその評価がなされた。

最近では最初の設計で相応の効率が得られるがこれをさらに向上させることは困難になりつつある。三次元流れの理解によりわずかの効率向上は見込めるが、細部の

流れの改善の積み重ねが必要となる。

引き続き米国 MIT の E. M. Greitzer 教授と GE 社の David C. Wisler 博士がお二人 (写真5) で「ガスタービン圧縮機技術：現状と可能性 (Gas turbine Compressor Technology: Status and Opportunities)」という題で講演された。

1950 年代以降、エンジンの単位スラストあたり燃料消費率 (TSFC) はかなりの低減化が達成されているが、それ以上の低減は一層困難となっている。総合効率の増加の大きな部分は推進効率の変化によって達成された。

ファンや圧縮機の流れの計算シミュレーションは、今や製品の設計開発に不可欠な部分である。

最近の National Research Council の調査によると、今後の圧縮機問題として作動マージンをより有効に利用するためあるいは作動限界を移動させるために閉ループ制御を用いた“知能的”ガスタービン、寿命を最大とするようなエンジン運転の設計、部品の交換を可能とする監視、空気力学的不安定の能動的制御、騒音低減、などがあげられている。更に新しい圧縮機技術として、余裕 (Affordability)、維持 (Maintainability)、サービス (Service-ability)、生産 (Manufacturability)、運用 (Operability)、信頼 (Reliability) など多面性を考慮する必要がある。

これは横断的な考え方であり、性能よりもっと広い観点で理解される必要がある。

学術講演の最終日 18 日には石川島播磨重工業㈱の伊藤源嗣氏 (写真6) が「21 世紀における民間航空用ガスタービン (Commercial Aircraft Gas Turbines in 21st Century)」の講演を行った。

航空需要は今後 20 年間で 3 倍となることが予想されるが、このためには社会的あるいは顧客からの最重要課題である環境適合性、すなわち低騒音・低エミッションに答えねばならない。NASA においても AST プログラムで、騒音について 10 年間で 10 dB の低減を、エミッションについて NO_x, CO, THC を、何れも現状の半分にする技術を目指している。同時に低コスト (取得コ

ストおよび運用コスト)と安全・信頼性が求められており、燃費の改善にも引き続き注力が必要であるなど民間エンジンの全体動向を紹介した。また次のような各現用機種別エンジンについて需要動向と技術課題などを展望された。超大型機・超長距離機, 200~300 席広胴機, 100~200 席狭胴機, 50~100 席リジョナル機および 50 席以下の機体などである。また, SST 機用エンジンについては, 米国では HSCT プログラムを推進してきたが SST 開発への動きはない。我が国の HYPR プログラムでは騒音特性などの貴重なデータが得られ, 引き続き ESPR プログラムで新材料, 騒音低減, NO_x 低減等に取り組む計画で, いずれ SST の国際共同開発の立ち上げが期待される, と結んだ。

3.2 特別分野講演 (Organized Session) の概要

次に Organized Session (OS) として行った 6 つの特別分野の講演内容概略を示す。

OS1: セラミックガスタービン 吉識東京大学教授と川崎重工(株)の山本氏が座長となり 5 件の発表を行った。はじめの 3 編の論文はセラミックガスタービン開発のための国家的プロジェクトに関するもので, 世界で最も進んでいる米, 欧, 日の 3 つの地域から出ている。残りの 2 編は材料に関するものである。OS-101 および OS-103 の論文はいずれも 42% を超える高効率の小型タービンを狙っている。

前者における効率および後者における NO_x 低減の成果は, 関係者を大いに鼓舞するものである。OS-102 のものは前 2 者に比べてかなり寸法が大きく, 既存の産業用ガスタービンの高温部部品をセラミック製に入れ替え, さらにこれらの部品の寿命を延ばす開発が続けられているというものであった。

OS-104 は複雑な形状のセラミック部品の新しい成型法について紹介し, OS-105 は X 線によるガスタービン部品の検査に関するもので, 主に標本移動を取入れた新しい画像相殺法と微小焦点を用いた X 線 CT を紹介した。

OS2: 船用および産業用ガスタービン 本セッションは, 下記 5 編の論文で構成された。講演は, 座長の富山県立大学葉山眞治教授が本セッション全体をレビューした後, 下記 5 名の講演者が発表だけを各々 15 分行い, 質疑討論は約 50 分パネル討論形式で行われた。同じ質問が複数の講演者に対して問われる場面もあり活発な討論がなされた。

OS-201 は日本のガスタービンメーカー 5 社で構成する SMTG 研究組合が 1997 年以来開発研究をすすめている 2500 kW 再生サイクル型船用ガスタービンに関するもので, 2002 年にプロトタイプ完成が予定されている。

OS-202 では, 中国の Baoshan 製鉄所向け 150 MW 一軸型コンバインドサイクルプラントの概要が述べられた。

OS-203 の WR 21 は RR 社の RB 211 をガスジェネレータ, TRENT をパワータービンに利用した中間冷却再生型艦艇用ガスタービンに関する研究である。

OS-204, OS-205 はいずれも航空転用ガスタービンをベースに開発した排水ポンプ駆動用ガスタービンに関するもので, 立軸ポンプの真上に出力軸を垂直に配置する。都市型排水ポンプ設備建設コスト低減のための省スペース化, 騒音, 振動, 排気ガスなどの環境保全性, ポンプ設備の無水化などの要求にガスタービンが応えている。OS3: 先進コンバインドサイクル ABB 社の Hoffmann 博士と三菱重工(株)の青木博士が座長となり 4 件の発表がなされた。

OS-301 は 1999 年 7 月に運開した, 東北電力(株)東新潟火力発電所に採用された三菱重工(株)製の M 701 G 1 ガスタービンに関する発表で, 発表後, 運転実績, 性能, プラントシステム等について活発な質問がなされた。

続いて, 上記ガスタービンの姉妹機で先行して運転開始した 60 Hz 機 1500°C 級ガスタービンの運転状況が OS-302 として発表された。同ガスタービンは同社内にあるコンバインドプラント長期実証設備に設置され, 1999 年 11 月時点で約 7000 時間の運転, 及び約 300 回の起動回数の実績を積み, 現在も順調に運転中であると述べられた。

OS-303 は CO₂ 回収システムをコンバインドサイクルに結合した場合の CO₂ 回収量, コンバインド効率について評価した結果が船舶技術研究所により示された。

OS-304 ではシーメンス社がベトナム・フーミーに納入した V 94.2 ガスタービンプラントの運転実績が示された。現在シンプルサイクルの運用であるが, 2000/2001 年にはコンバインドプラントへ移行する予定である。

OS4: 先進材料とコーティング ボルボエアロコーポレーションの Gabriellsson 博士と三菱重工(株)の佐近博士を座長として 5 編の発表があった。

OS-401 では, 最近注目されている軽量金属間化合物の TiAl 合金について最近の研究開発動向が報告された。続く OS-402 では, 高温強度に優れる酸化物分散強化型合金 (ODS: Oxide-Dispersion Strengthened alloy) の 2 次再結晶と残留歪みの関係の報告があった。ODS 合金の不明確であった材料の残留歪みと 2 次再結晶との関係を明確化するというものであった。

また OS-403 では, 単結晶合金 (SC: Single Crystal) の設計と材料特性について報告された。OS-404 では, 独自に開発した動翼用新 Ni 基合金に関するもので, 実機適用状況について報告された。

このように, ガスタービンの動翼材料が, 国内で開発/実用化が既に行われていることが一部で示され, 我が国のガスタービン用材料開発力もようやく, 欧米に迫りつつあると感じることができた。

OS5: HYPR-HST/SST 推進システム 超音速推進システム組合の石澤氏と石川島播磨重工業(株)の中村博士を座長として 7 件の発表があった。

まず座長から OS-501 で平成元年より 10 年間にわ

たって実施された国家プロジェクト“HYPR”(次世代超音速輸送機用推進システムの研究)のねらい、参加企業・機関、主な成果などの概要が説明された。

OS-502 では地上静止状態からマッハ5まで飛行するコンバインドサイクルエンジンのGE社の装置による高空性能試験、論文OS-503ではタービン入り口温度1700℃技術実証のための高温コアエンジン(HTCE)、OS-504ではNAL角田において実施したマッハ5フリージェット試験の結果、またOS-505では次世代超音速輸送機の支配的な音源となるジェット騒音の低減のため、いくつかの要素模型試験と、RR社の設備を用いたエンジン地上騒音試験について報告があった。

OS-506ではHYPRエンジンに組み込むための2段ファンおよび単段可変冷却低圧タービンの開発と、エンジン試験、OS-507ではメタン燃料を用いた予混合ジェットスワラ型燃焼器およびセクター模型によるマッハ3巡航状態試験に関するものであった。

最後に座長がHYPRに続き立ち上げられたESPRプロジェクトの概要を紹介し、SSTの国際共同開発への期待を述べた。

OS6: 非定常空気力学/振動 難波熊本工業大学教授と北京航空宇宙大学のSun教授が座長となりターボ機械における非定常流体力と、翼あるいは軸振動との関連を扱った6件の発表がなされた。

冒頭に行われた難波座長の基調解説の中で、近年の研究の進展が五つの内容に分類して分析された。即ち、(1)数値流体解析の2次元から3次元への拡張および非粘性解析から粘性解析への発展、(2)空力解析と構造解析の統合への進展、(3)モデルの実機への接近、(4)剥離、衝撃波振動、翼端間隙効果など複雑な流れ場へのアプローチ、(5)パネルモード、ミスチューニング、ロータダイナミクスなど、複雑な振動現象、振動モードの取り込み、である。また、新たに取り組むべき課題として、多段翼列のフラッタと、空力弾性振動の能動制御を挙げられた。

講演のOS-601では、圧縮機翼の振動について、OS-602では、ターボチャージャーの半径流タービンにおける非定常空気力および翼振動特性を、OS-603では、翼列の振動を、ディスクの振動を含めて解析した。

OS-604では、衝撃波振動を伴う圧縮機翼列の非定常空気力を、一翼振動法で測定した結果を報告した。

OS-605では、歳差運動を行う遠心圧縮機軸に働く流体力モーメントの特性を実験的に明らかにした。

最後にOS-606で軸流ターボ機械において、動翼先端の翼端不等間隙がもたらす、ロータ系の不安定振動を解析した結果を示した。

3.3 一般技術講演の概要

(1) 開発性能関係

開発、性能関係はそれぞれ論文数12件、論文数11件の発表があった。性能関係で3番目のセッションにもう1件予定されていたウクライナのSlitenko氏による講演

(TS-22)は、事故で発表者の会議参加が不能になったためキャンセルとなった。

GE社が石炭ガス化プラントの運転実績について、またABBの50MW級、GT8C2エンジンについて、そしてソーラタービンのMercury 50用の温度効率90%を越える再生器についての発表が注目を集めていた。また、川崎製鉄によりABB社製の再熱型ガスタービン(GT-26)を採用したKA26-1ガスタービンコンバインドIPPプラントの設計仕様および予想性能についての紹介があった。

WE-NET関連では、発電設備技術検査協会がプロジェクトの現況を、日立が1700℃クロード水素燃焼ガスタービンの静翼および動翼の高温翼列試験結果について発表した。

新コンセプトとして、600MWtのリアクターを用い、不活性ガスであるヘリウムを850℃に昇温しクロードサイクルとしたタービン発電プラントのフィージビリティスタディの紹介があった。

サイクル関係では、電力中央研究所が、天然ガスを燃料とした二酸化炭素を分離回収するクロードサイクル、水素燃焼ガスタービンおよびCAES(Compressed Air Energy Storage)プラントの発表を行った。

ターボチャージャー関連では、ハノーバー大学からターボチャージャーの動特性およびターボチャージャー用圧縮機のポリユートについての試験結果の報告があった。

(2) 空力関係

陸用、航空用ガスタービンとも、圧縮機の性能向上に関連して、翼列の圧力勾配の改良や最適化、Double Oblique Shock構造を実現する翼設計、空力損失推定法の提案などに関する報告があった。また空力損失に対する翼表面粗さや汚れの影響の検討、リブレット、あるいはボルテックスジェネレータによる損失低減の試み、タービンシュラウド部シール段数と漏れ流量並びに損失との関係の検討などの報告があった。

多段性能については、GTユーザから見た全体性能マップの推定構築法、多段翼列としての空力最適設計手法、入り口ケーシング内部流れの設計改良等の報告があった。遠心圧縮機について、効率アップとの両立を狙う作動範囲拡大設計法の提案、8種類のデیفューザの比較検討があった。またアニュラーデیفューザに関する検討があった。

設計ツールとしての計算空気力学(CFD)では、亜・遷音速の粘性・非定常流れの解析法、翼列内部の低レイノルズ数の遷音速粘性流れ解析法、失速点近傍での境界層遷移と衝撃波-境界層干渉を考慮した非定常空気力算出法など空気力算出の高精度化、および円柱周りの3次元圧縮性流れのLES、同じく円柱周りの高レイノルズ数固気混相流動における固体粒子と渦との相互作用解析法など基礎的研究の報告があった。

その他、非定常流れ(Unsteady Flow)に関するセッ

ションがB室において3セッション、それぞれ3件づつの発表が行われた。非定常流れと騒音の制御 (Control of Unsteady flow and Noise) として設けられたD室のセッションでは4件の発表が行われることになっていたが、会議開催直前にインドの Nagpurwala 氏より参加キャンセルの申し出があり、同氏の論文 (TS-84) の発表が無かったので結局3件のみの発表となった。

非定常流れの3セッションでは、失速線近傍でのフラッタに関する数値解析や衝撃波に関連する不安定性の解析、軸流および遠心圧縮機における旋回失速発生 of 捕捉、サージのモデル解析、円形翼列およびディフューザにおける非定常流れ、拡散制御翼で構成される3段圧縮機における非定常流れの詳細な計測、翼端渦と下流静止翼との空力干渉などを扱った論文が発表された。また、非定常現象の制御に関するセッションでは、回転機械空力音の抑制、ガスト干渉による非定常空力力の音響信号による制御、インピーダンス可変な音響壁を用いたフラッタ能動制御の研究発表があった。非定常内部流の分野における先端的な内容を含む、意義ある4セッションであった。

(3) 伝熱関係

伝熱関係では、4つのセッションで14編の論文が発表された。翼外面の熱伝達率分布に関して WE-NET Project の一環として実施された 1700℃ 級タービンの第一段静翼周りの熱伝達率分布を、液晶を用いて詳細に測定した結果が報告された。フィルム冷却に関連する論文は3編報告された。

内部流路の伝熱に関してタービュレンスプロモータ付き流路について2編の論文が報告された。それらの内1編では流路の流れをLDVで詳細な計測を実施し解析解と比較したものであり、もう一方は詳細な流れの可視化を行い、二次流れが伝熱促進に強く寄与していることを明らかにしている。

燃焼器壁あるいは次世代のタービン翼の翼壁構造として衝突噴流と全面膜冷却を組み合わせた冷却構造が提案されているが、これらを構成するパラメータの影響を実験的に調べた2編の研究と、衝突面にピンフィンを加えて伝熱性能を高めた効果を液晶で確かめた結果が報告された。

翼の伝熱性能では1700℃ 級 WE-NET の第一段静翼の高温翼列結果、TBC 施工のタービン第一段動翼の実機運転性能、TBC 施工の遷音速タービン静翼のガス側境界条件と熱伝導を同時に解く解析手法と高温翼列試験結果との比較が報告された。一方、伝熱解析では流体側の熱伝達と熱伝導がカップルした非定常の円管のメタル温度解析と実験との比較、また LES による衝突噴流の衝突流付近の複雑な流れの解析と、実験値との比較が報告された。

(4) 燃焼関係

燃焼器要素 (Combustor Elements) 4件、燃焼器数



写真7 パネル討論会の様子

値計算力学 (Combustor CFD) 関係で5件、窒素酸化物低減 (NO_x Reduction) として設けられた3セッションでそれぞれ4件、4件及び3件の発表がなされた。これら燃焼関係論文20件のうち直接 NO_x 低減に関係しているものと NO_x 低減用燃焼器開発要素研究を合わせると14件、70%にも上る。製品化に向けガスタービン燃焼器以外の研究では気流微粒化を含む混合気形成、保炎、火炎安定性などを研究したものがあり、その技術が低 NO_x 燃焼器実現に Key technology となっていることが伺える。

(5) 要素部品と材料

保守と制御 (Maintenance and Control) に関して4件および5件の発表を含む2セッションが設けられた。

軸受けとシール (Bearing and Seals) は4件の発表があった。それらでは新材料や新技術の応用研究、高温・高速環境におけるベアリングとシールの開発研究が紹介された。材料 (Materials) のセッションでは5件の発表がなされた。ここでは各種材料の疲労や応力状態、高温環境などの要因から制限される寿命に関する研究、保守管理手法に関する研究、実際の発電システムの運転経験に関する研究などが発表された。また、ガスタービンへの CMC の応用研究や、先進セラミックスおよび新しい耐熱合金の開発研究が発表された。

3.4 パネル討論会の概要

「環境問題に対するガスタービンの貢献 (Gas Turbine Contribution to Environmental Concerns)」というタイトルでパネル討論会が設けられた。座長は前記 Bahr 氏と大阪大学の香月教授がおこなった。パネリストとして芝浦工業大学平田 賢教授、三菱重工業㈱の萬代重美博士、東京ガスの三浦千太郎氏、それに Bahr 氏も加わった。

まず、司会の香月教授が話題の論点を紹介し、引き続き各パネリストの話題提供があり、最後に会場からの質問などにより討論した。

最初に平田教授より「炭酸ガス排出量減少のための天然ガス利用による高効率発電の展望」と題する話題提供が行われた。地球温暖化防止には高効率システム技術が

重要である。高効率発電の基本的考え方は水力発電と同様、高温から低温までの熱のカスケード利用にある。

また、アジアにおける天然ガスの需要増大傾向から日本などへ天然ガスを輸送するインフラストラクチャーを整備する必要がある。天然ガスだき高温ガスタービンを主機とする高効率発電システム技術としては、他のシステムと組み合わせ出力増大と効率向上が可能である。最後にシステムエネルギー技術による炭酸ガス排出量減少の可能性について紹介があった。

つぎに、「環境問題の観点から見た産業用ガスタービンの発展」と題して萬代氏から話題提供があった。

エネルギー問題の3Eトリレンマとして、経済、エネルギー資源、環境があり、ガスタービンにおけるこれら問題への対応状況が説明された。

各ガスタービンメーカーは排気規制に対処して、精力的に研究開発をしているが現在、希薄予混合燃焼方式燃焼器の振動燃焼が大きな課題となっている。

エネルギー資源は限られていること、第2次世界大戦以降のエネルギー消費量の伸びが著しいことから、高効率化により省エネルギーをはかるとともに、燃料多様化を計る必要がある。短期的には天然ガスのほか、工場の副製油、副製ガスをガスタービン燃料として使用することがあり、長期的には石炭ガス、水素などがある。「航空用タービンの排気低減対策」と題して、司会者であり、かつパネリストでもある Bahr 氏から話題提供がなされた。

1960年代の第1世代エンジンの席あたり相対燃料消費量を100とすると、1990年代の第2世代エンジンでは30、排出物もそれに伴って激減している。NO_x低減手法としては、火炎温度を低く保つ希薄拡散燃焼、希薄予混合燃焼方式があり、高負荷条件で希薄になるように設計しているため、低負荷では燃料、または空気の段階制御が必要となる。また、第1段燃焼領域からの中温燃料過濃ガスを第2段燃焼領域で急激に希釈、混合するこ

とにより中温ガスにして、高温領域を回避して燃焼するものもある。これらはNASA、GEおよびP&Wなどで研究開発が行われている。

最後に、「マイクロタービン」と題して三浦氏より話題提供があった。環境保全、低コストへの要求から、近年、風力、太陽光、バイオマス、燃料電池などの分散型電源を指向した動きがあるが、技術的にオーソドックスなマイクロタービンが登場して話題となっている。これは送電ロスの減少、量産効果による設備費低減、および建設期間の大幅圧縮を図ることにより、電力コスト低減が期待される。

マイクロタービンの特徴として、レシプロより小型軽量、排気ガスが清浄、可動部品の高信頼性、メンテナンスが容易、レシプロなみの効率、静粛性、低設備費、高温排熱利用可能、多種燃料が使用可能などがあげられる。

マイクロタービンの要素としては過給器、高速発電機、熱交換器であり、既存技術のみの集大成であり、このような非先端の商品が発電ビジネスに登場するのは前代未聞、画期的といえる。

このA会場におけるパネル討論会には満席に近い多数の参加者があったが、結果的に討論の時間が不足し、個別の発表と質問に留まったのは、期待が大きかっただけに残念であった。

4. おわりに

会議を振り返ってみて、種々の反省点はあるものの、これまでで最大の参加者と発表論文数があったことは学会会員各位および関係者の絶大なる協力と貢献があった賜と考えている。同時に今回の国際ガスタービン会議はこれまでと異なり、初めて関西で開催したものであったため、関西地区の企業や大学の各位に一方ならぬお世話になったことを深く感謝いたします。



1999 年国際ガスタービン会議報告 展 示

展示委員会委員長 星野 昭史*¹

HOSHINO Akifumi

1999 年 11 月 15 日(月)から 18 日(木)の 4 日間に渡り 1999 年国際ガスタービン会議神戸大会の併設展示会が、神戸国際展示場にて実施された。この展示会の実施状況について報告を行う。

1. 開始前概況

本展示会の実施は、1999 年国際ガスタービン会議組織委員会の下に設置された実行委員会の中の展示委員会が事務局となり、展示業者とともに任にあたった。一番の困難を極めたのは、国内の不況による企業の広告宣伝費の縮小に伴う参加会社の減少、展示小間数の減少であった。当初は、前回横浜大会の 37 社 140 小間を目標にしていたが、12 月時点に至っても 100 小間数を越えるに過ぎず、困難を極めた。しかし組織委員会等関係各位の絶大な協力の下に最終 43 社 130 小間を数えるにいたった。この数値は、参加会社が前回の 37 社を上回ったことで景気低迷の中にも拘らず、ガスタービン等に対する関心の大きさが、窺い知れる。

2. 参加会社及び小間数

出展者番号	会社名(国内)	今回小間数
1	石川島播磨重工業株式会社	12
2	川崎重工業株式会社	12
3	新川電機株式会社	1
4	進和テック株式会社	2
5	ゼネラル・エレクトリック・カンパニー	14
6	株式会社東芝	12
7	日本ドナルドソン株式会社	2
8	株式会社日立製作所	12
9	丸和電機株式会社	1
10	三井造船株式会社	2
11	Allen Gears Ltd.	2
12	株式会社荏原製作所	2
13	光洋精工株式会社	1
14	三協インターナショナル株式会社	1
15	株式会社先進材料利用ガスジェネレーター研究所	2
16	ソーラータービンズインターナショナルカンパニー	2
17	ダイハツディーゼル株式会社	2
18	株式会社ナック	1
19	日本ウッドワードガバナー株式会社	2
20	ノーザン・リサーチ・アンド・エンジニアリング・コーポレーション	1
21	ダイヤ精密鍛造株式会社	1
22	三菱重工業株式会社	12
23	ヤンマーディーゼル株式会社	4
24	社団法人日本ガスタービン学会	1
25	Concepts ETI, Inc.	1
26	イーグル工業株式会社	1
27	トヨタ自動車株式会社	1

出展者番号	会社名(国内)	今回小間数
28	スーパーマリンガスタービン技術研究組合	1
29	株式会社トヨタタービンアンドシステム	2
30	株式会社タクマ	3
31	Allied Signal Composites Inc.	1
32	Wood Group Gas Turbines	1
33	Turbocam Inc.	1
34	エスエスエスギアーズ株式会社	1
35	バーバー・ストックウエル	1
36	新エネルギー・産業技術総合開発機構	4
37	京セラ株式会社	2
38	岩谷産業株式会社	1
39	シールテック株式会社	1
40	Advanced Design Technology Ltd	1
41	Mee Industries Inc.	1
42	アイコクアルファエンジニアリング株式会社	1
43	AEA ハイプロテック株式会社	1
合計	43 社	130

3. 展示期間での新しい試み

今回の新しい試みとして、会議場より離れている併設展示会としてのイメージアップを図るため、オープニングセレモニーを企画した。会場のエントランスに式場を



原稿受付 2000 年 2 月 14 日

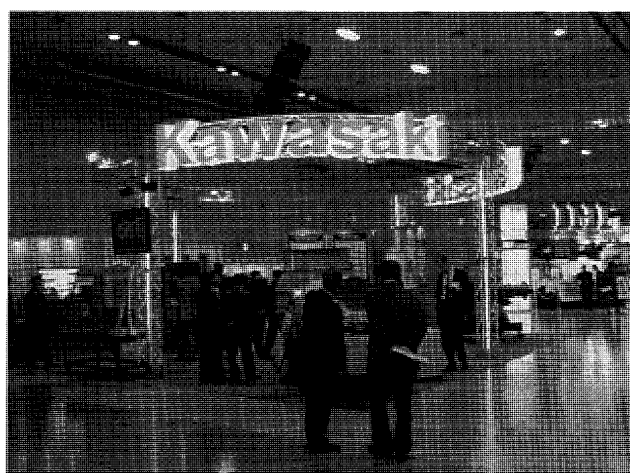
* 1 川崎重工業(株) 汎用ガスタービン事業部
〒673-8666 明石市川崎町 1-1

設け、主催者挨拶、展示会社代表挨拶後に、ファンファーレを合図にテーブルカットを行い会場を巡回した。

4. 会期間の入場者数

(人)

日程	時間	天候	入場者数
11月15日(月)	9:00~17:00	曇りのち雨	566
11月16日(火)	9:00~17:00	晴	726
11月17日(水)	9:00~17:00	晴	757
11月18日(木)	9:00~13:00	曇	510
入場者 合計			2,559



5. 展示風景

会場レイアウトが、比較的スムーズに配置できた。そのため展示見学者がゆとりをもって見やすかった。

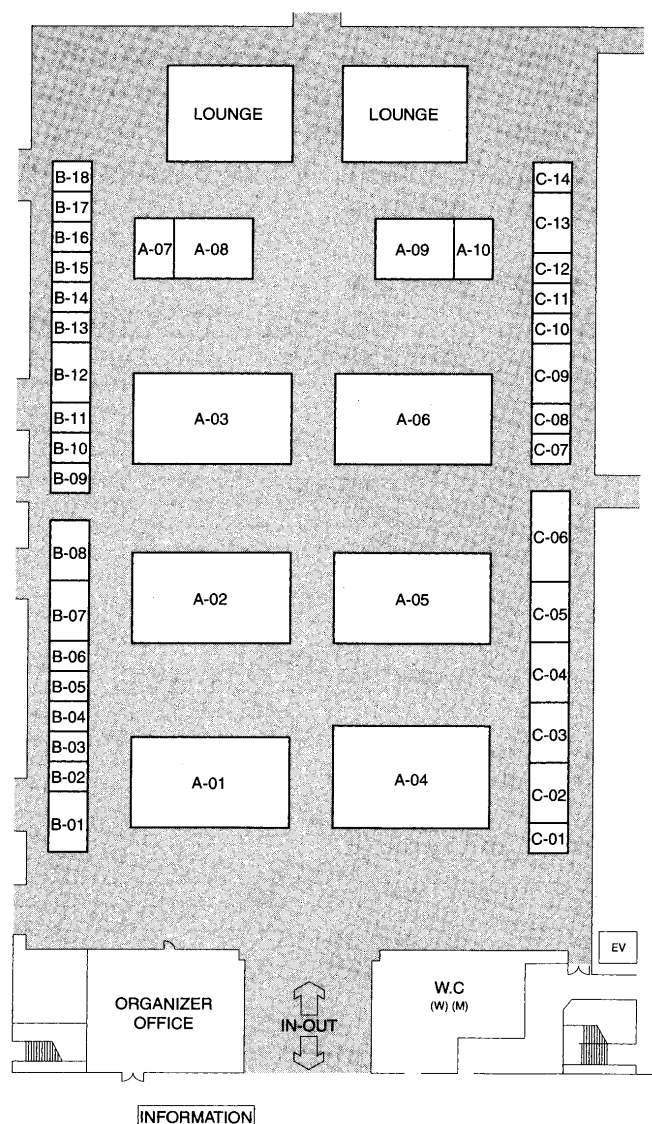
6. 今回神戸大会展示会の反省・改善提案

イ) 反省点 (入場者の少なさ)

- ・会場が、会議場から徒歩10分と離れていたため会議の合間に見学する時間が無かったこと。
- ・国際会議場の会場がポートアイランドの中という会議が目的では無い人が来る環境になかったこと。
- ・会議のスケジュールが盛りだくさんのため、会議終了時間が展示会の終了時間より早かったため、展示会見学を目的にしなければ、展示会見学ができなかった。
- ・最終日の展示会のスケジュールが半日であること。

ロ) 改善案

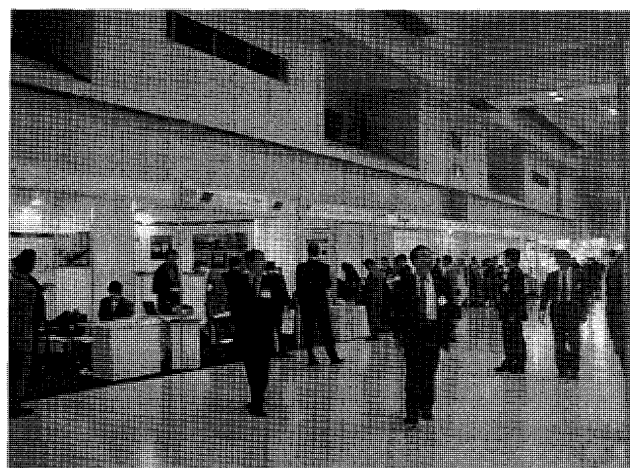
- ・併設の展示会からの脱皮
- ・会議スケジュールの変更
- ・日程・期間の見直し
- ・海外メーカーの参加拡大



7. まとめ

展示会としては、入場者の少なさの改善・改革は今後検討事項として残るものの、ガスタービン展示品に対する入場者の関心の高さが窺い知れた。各ブースでの熱心な質問、それに対する出展企業の受け答え等、かつ質の高いやり取りが会場の全てのブースで見られ本展示会ならではの良い雰囲気に満ち溢れていた。

最後に今回展示参加会社のガスタービンにたいする期待の大きさ及び本展示会への協力に対して厚くお礼申し上げます。





1999 年国際ガスタービン会議報告 国際交流委員会及び諮問（外国人）委員会の合同会議

国際交流委員会委員長 長島 利夫^{*1}

NAGASHIMA Toshio

IGTC '99 Kobe 会期終了の前日、11月18日(木)午後12時から1時間半にわたり表記合同委員会が開催された。参加者は、学会から伊藤源副会長はじめ国際交流委員会（以後、交流委と略）委員、さらに有賀一郎組織委員長及び葉山眞治実行委員長など日本人14名、ならびに外国からIAC (International Advisory Committee) 委員ら14名であり、後者の内訳は共催学会やEC、米国、中国などの主要代表機関からの会議出席者であった。議題は、1) 学会組織上の交流委の位置付けやその活動の近況、特にアジア(中国)における協力関係の報告、2) IGTC 発展を通じての国際協調の指針であった。議案提示では30年に及ぼすIGTC経緯の資料が用意され、今後さらに学会がIGTCを舞台に国際性に富む活動展開を遂げるために、IAC委員の新たな選任やASMEとの協力改善の模索など、交流委が目標とするところを説明した。また、IAC委員による交流委側との一層の情報交換と支援も要請した。これに対し、各IAC委員から、主に今回の神戸大会運営などを踏まえてのIGTCに関する評価や要望が陳述された。そうした後、出席者すべてが次回IGTCでの再会を期し、無事に討議を終了した。

IAC発足は前回1995年IGTC横浜大会会期中といわれるが、臨時委員会としての役割や人選など明確でないとの意見も聞かれる。当合同委員会で外国メンバー側から得たコメントは、そうした杞憂を一掃する貴重なものであり、用意周到な会場準備に迫られた日本側当事者にとって見逃し易い視点からの反応であった。出された意見は、IGTCに関して、1)開催時期を他の主要なガスタービン関連の国際会議との衝突を出来る限り避けること、そのために、2) IACはじめ情報の接触点となる人々の連絡網を欠落無く構築すること、3) 日本の自主性を発揮しつつアジア・北米・欧州の3極圏を巡るガスタービン会議の国際環境を育成すること、また、大会運営では、4) 高水準な基調講演の現状を是非維持すべきこと、5) 生産・利用・研究開発の3者一体のパネルを充実すること（ただし、2時間を越えるセッションは聴衆にとり興味持続不能）、6) 発表質疑や昼休みに十分な時

間を配分すること（各講演は区切り良く30分、早朝開始や時間延長も止む無し、展示にも配慮）、7) 論文投稿締め切り時期が他会議に比べ早すぎる、8) 会議予稿集印刷とCD-ROM双立の検討を進めることなどであった。IGTCがガスタービンに関する国際サミットのように位置付けられることは願わしく喜ばしい。そして、国内外における学会とその会員の活動が、時代に即したダイナミックな状態にあるかを定期点検する有意義な機会として捉えたい。IACの更なる充実発展は、その両方に役立つ重要な鍵を握ることに通じるであろう。

ASME（ガスタービン関連は、その下部組織IGTI—International Gas Turbine Institute—が担当）との協力関係構築は、上記の点からも重要であり、以前から交流委の継続審議事項とされてきた。残念ながら、ASMEは1987年第4回IGTC（東京）以来、共催学会から名を消している。ASMEの世界戦略も影響して、冷えた関係は放置されたままであり、前述の3極圏構想からいうと他のアジア諸国が最も注目するところになる。幸いに今回の神戸大会には、ASME-IGTI会長に数年後に選出される期待人物が招待講演のため来日した。彼は当合同会議こそ欠席したが、個別相談に應對していただき討議を重ねた結果、幸運にも協力関係修復ばかりか、新たな協力関係を模索することを約束し、ASME-IGTI執行部会議に諮る手はずをとりつけることができた。つまり、何故IGTCのボタンを掛け違えたかを詮索するより、ボタンを元通り掛け直す方が今は大事との印象を両者が一致して認識したわけである。もちろん、相談の結果が直ぐに実行に移されるか樂觀は禁物である。しかし、IGTCという場が、皮肉にも、こうした直接交渉を可能にする絶好の機会でもあった点は重要と考える。ガスタービンを共通の話題と実践に据えて、世界中から一人でも多くのIGTC参加登録を募り討議すれば、自ずと人と物の一層のつながりが進展しよう。神戸大会で生まれたこの機運を大事にしたいと願いつつ本報告を終える。

原稿受付 2000年1月31日

*1 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
〒113-8565 東京都文京区本郷7-3-1

第1回工学熱物理国際会議報告 (ICET'99)

長島 利夫^{*1,3}
NAGASHIMA Toshio

顧 春偉^{*2}
GU Chunwei

山口 和夫^{*1}
YAMAGUCHI Kazuo

第1回 ICET (INTERNATIONAL CONFERENCE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS) が昨年8月に北京で開催された。この国際会議は中国工程熱物理学会と米国 ASME との共催によるものであり、日本ガスタービン学会国際交流委員会としてもその成功に少しでも貢献すべく出席した次第である。また、筆者の1人は、この会議に係る中国工程熱物理研究所に所属していた経緯もあり、様子を簡単に報告したい。

1. 開催趣旨

工学における熱物理研究は、航空宇宙、機械、原子力、化学等多種多岐の工学に亘っており、21世紀に向けてその重要性がさらに増して行く分野であろう。ICETは、このような工学熱物理に携わる世界中の研究者・技術者に最新成果の発表と討論の場を設け、同分野での相互の発展を目的としたもので、中国の呼びかけにより実現した。主催者として、上記2学会のほかに中国国家自然科学基金委員会が名を連ねている。中国工程熱物理学会は、中国工程熱物理研究所を開設(1956年)した故 WU ChungHua (呉仲華) 教授を中心として、1980年に設立され、現在会員数6,000名を誇り、国内の関連諸大学の多くが会員となり活発な活動を行っている。

2. 開催次第

第1回 ICET は、中国工程熱物理学会の理事長 Ruixian Cai 教授と米国 ASME (Board of Science) の Chang-Lin Tien 教授を会長に、また中国工程熱物理学会の副理事長 Jianzhong Xu 教授が組織委員長となり、北京市郊外の香山飯店にて1999年8月19日から21日までの3日間開催された。参加は、13ヶ国におよび、中国(台湾を含む)、日本、アメリカ、ドイツ、イギリス、イタリア、ブラジル、インド、カナダ、フランス、スウェーデン、ポーランド、韓国から総数およそ100名の参加者があった。

19日は、午前中に参加登録と開会式が行われた。

原稿受付 2000年1月31日

*1 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
〒113-8685 東京都文京区本郷 7-3-1

*2 東京大学 大学院

*3 (社)日本ガスタービン学会 国際交流委員長

Ruixian Cai 教授による開会の辞に続き、Chang-Lin Tien 教授の歓迎の辞が述べられ、その後、招待講演、そして昼食後、分野別の各部屋に分かれて一般講演が行われた。20日は、一般講演のみが行われた。21日は、午前中一般講演、午後に招待講演が行われ、終了後、閉会式が行われた。

3. 講演関係

紙面の都合上、招待講演についてはタイトルと講演者のみを、一般講演については、会期中のセッション名のみを記す。

●招待講演

6件の講演者、タイトルは以下の通りである。テーマや対象は、伝熱、エネルギー、回転機械、航空エンジン、燃焼、混相流というように広範囲におよぶ。

- (1) C. L. Tien (USA):
"Development of Microscale Thermophysics Engineering"
- (2) E. Sciubba (Italy):
"The Concept of Extended Exergy Accounting and Its Application to the Optimal"
- (3) W. N. Dawes (UK):
"Challenges for Turbomachinery CFD in the 21st Century"
- (4) B. Lakshminarayana (USA):
"Flow Field in Multistage Turbomachinery State-of-the-Art Challenges for the Next Decade"
- (5) C. L. Law (USA):
"Advances and Challenges in Combustion Science"
- (6) Z. Lin (China):
"Recent Research Tendency and Application of Multiphase Flow"

●一般講演

研究分野により Thermodynamics, Aero-Thermodynamics, Heat Transfer, Combustion, Multiphase Flow の5分野11ヶのテクニカルセッションに分けられ、論文の発表は、講演20分、質疑10分の合計30分で行われた。

(下記、() 内数字はセッション番号)

19日・Thermodynamics(1)

- ・ Aero Thermodynamics(3)
- ・ Heat Transfer(6)
- 20日・ Thermodynamics(2)
- ・ Aero Thermodynamics(4)
- ・ Heat Transfer(7), (8)
- ・ Multiphase Flow(11)
- 21日・ Aero Thermodynamics(5)
- ・ Heat Transfer(9)
- ・ Combustion(10)

論文発表件数は97編で、中国が58編と半数以上を占めた。表1にそれら内訳を項目別と国別に示す。日本からの参加者(敬称略)は、日向野(秋田県立大), 工藤(北海道大), 本田(九大), 門出, 王(佐賀大), 小林(日

表1 第1回 ICET 北京大会の項目別と国別発表件数

項目 \ 国名	日本	中国	インド	韓国	アメリカ	カナダ	イギリス	フランス	ドイツ	イタリア	オーストラリア	ポーランド	ブラジル
Thermodynamics	1	14									1		
Aero-Thermodynamics	3	16	1		1				4	1			
Heat Transfer	4	21	1	1	3				1			1	2
Combustion	2	3			2			1	1				
Multiphase Flow		3			1	1		1					
招待講演		1			3		1			1			
総計	10	58	2	1	10	1	1	1	7	2	1	1	2

大), 細川(姫路工大), 王(荏原), そして筆者ら3名(東大, 長島組織委員)の11名であった。

4. その他の行事

19日の講演終了後, ホテル内の池のある中庭で歓迎会が開かれた。池の周りには多数の屋台が出され, 特に中国北方料理である子羊の丸焼きが周囲に香ばしく, 各国参加者にその味と共に好評であった。また対岸に設けられたステージ上では, 軽音楽の演奏と, きらびやかな衣装に身を包んだ踊り子数人が登場しダンスを披露, 愛嬌を振りまき, 各国参加者の目を楽しませた。

20日の夜は, 会場近くの香山スキー滑雪場に同好の志を集めてスキー大会が開かれた。

21日夜には, ホテル内で Banquet が開かれ各国参加者が円卓を囲み談笑と中国の味を楽しんだ。最後には国別歌合戦となり, 日本組は急遽相談の結果「スキヤキ」(坂本九の上を向いて歩こう)を歌うことに決定, 歌唱後司会者から誉められた。各国参加者の熱唱もあって盛況裡に幕を閉じた。

明けて22日には, 会議も終了し幾つか企画されたツアーのうち希望者の多かった長城見学が行われ雄大な景色を楽しんだ模様である。

5. 会議の今後

会期中の International Committee と Organizing Committee による会議にて, 次回の開催期間と開催地について話し合いがなされ, 第2回 ICET を, 2002年11月を目標に香港の香港理工大学で行うことが決定された。閉会式で同大学の P. Cheng (鄭平) 教授より挨拶があった。第2回以降, 日本ガスタービン学会も共催を依頼される予定であり, アジア圏での連帯が深まってゆくことを願って止まない。

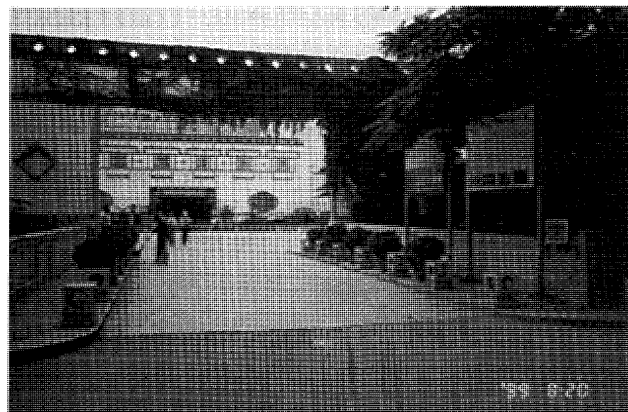


図1 会場入口(香山ホテル通用門)



図2 歓迎会風景



図3 閉会式

ガスタービン列車

長友 隆

NAGATOMO Takashi

1. はじめに

表紙の写真は、昭和45年7月に国鉄本線で走行試験を行った国鉄の形式キハ07形気動車を改造したガスタービン試験車とKTF1430型ガスタービンである⁽¹⁾。当時、川崎重工業(株)では小型ガスタービンの自社開発に取りかかるとともに、ガスタービンの応用研究を行っており各分野への用途開発に着手していた。発電用、鉄道車両用、自動車用、船用等について、それぞれの用途に応じたエンジンの設計変更、付属機器の開発そしてシステムの研究等を実施しており、ガスタービン列車の研究もその一環として行ったものである。

昭和45年当時、すでに、アメリカ、カナダ、フランスおよびドイツでは在来線の高速化のために、ガスタービン列車の実用化研究・試験が活発に行われていた。日本においても昭和42年から、日本鉄道車両工業協会が運輸省の補助金を得て在来線非電化区間用高速列車用としてガスタービン列車の研究を行ない、本研究もその一部である。一方、国鉄においても設計事務所が中心となってガスタービン列車の計画を進めていた。

在来線非電化区間用高速列車にガスタービンを利用する最大の理由は、出力／重量比がディーゼルなどに比べて大きいからである。我が国の場合、在来線の非電化区

表1 KTF1430型ガスタービンエンジン主要諸元

	項目	記事
構造	エンジン形式	2軸式ガスタービン
	コンプレッサ	軸流5段+遠心1段
	コンプレッサタービン	軸流2段
	出力タービン	軸流2段
	燃焼器	環状、燃料噴霧式
	出力軸減速機	遊星式、エンジン前方内蔵
性能	出力馬力	883kW (断続最大)
	出力軸回転数	3,000rpm
	燃料消費率	385 g/kW・h
	コンプレッサ回転数	25,910rpm
寸法	出力タービン回転数	19,500rpm
	全長	1,935mm
	全幅	767mm
	全高	1,042mm
	重量	700kg (内減速機 300kg)

間はほとんどが急勾配と曲線区間からなっていて、これを高速化するには平地および勾配での速度向上とともに、曲線区間の通過速度を向上させる必要があった。このためには出力を増やすとともに車両を軽量化して遠心力の増加を抑える必要があり、軽量で大出力が得られる原動

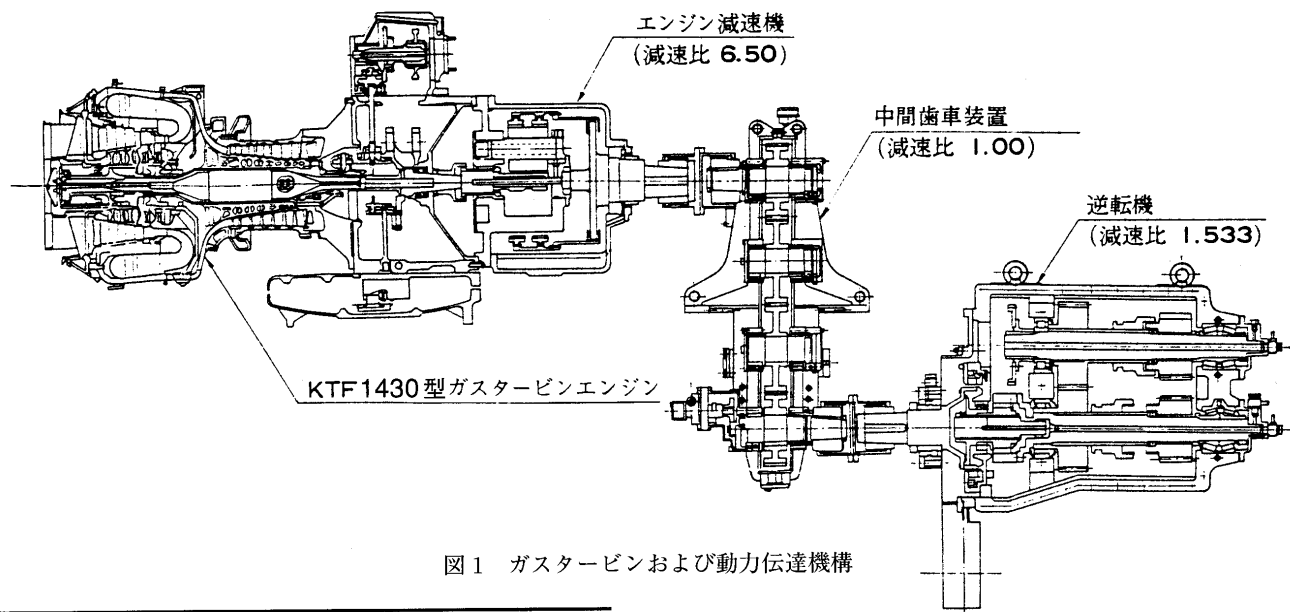


図1 ガスタービンおよび動力伝達機構

原稿受付 2000年2月4日

*1 川崎重工業(株) 汎用ガスタービン事業部 プロジェクト部
〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1-1

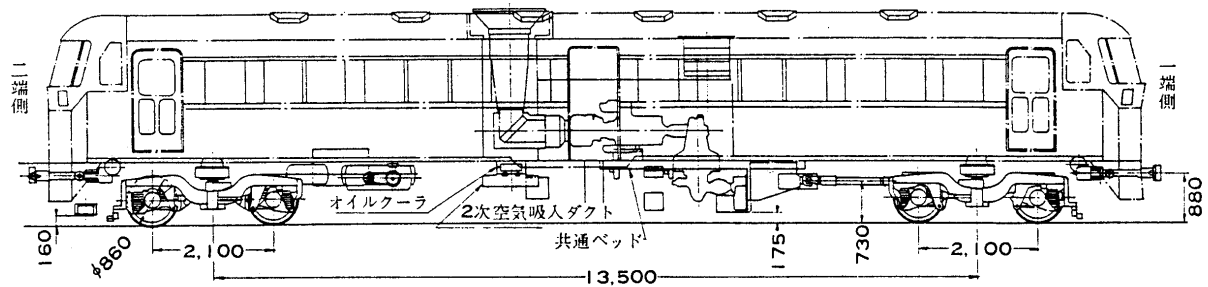


図2 ガスタービン試験車 機器配置図

機としてガスタービンが着目された訳である。

しかし、ガスタービンは軽量・小型で大出力が得られるという点で車両用としての基本的特性を備えているものの、その特性を生かして高速列車用動力装置として完成させるためには騒音、燃費、動力伝達方式、吸排気装置の配置や構造等の問題点があり、研究を行う必要があった。この研究はこのような問題についてガスタービン列車を実際に運転試験してみて、解決の糸口を見いだす目的で行われた。

2. ガスタービン

この研究に使用したガスタービンは KTF 1430 形 2 軸式ガスタービンで、ヘリコプタ用として川崎重工業(株)が Avco-Lycoming 社と技術提携して数多く製造している T 53 形ターボシャフトエンジンを、本体部分はそのままして、空気取り入れ口、補機駆動装置、出力軸減速機等を車両に掲載し易い構造に改めたものである。表 1 に性能諸元と定格点性能を示す。

動力伝達機構は純機械式で構成され、ガスタービン出力軸減速機から中間歯車装置、逆転機、推進軸を経て台車減速機につなぐ方法が採用された。図 1 にガスタービンおよび動力伝達機構を示す。

3. ガスタービン試験車

最初に車両のモックアップを製作して、ガスタービンを車両に搭載した場合の騒音対策について研究を行い、その結果を基に、ガスタービン試験車の設計を行った。試験車において KTF 1430 型ガスタービンは車両室内のほぼ中央部の車体台枠上に、吸排気装置とともに防音構造のパッケージに納めて固定された。吸気口は車体中央部両側面の窓と屋根の間の帯状部分に設けられ、吸気は吸気フィルタ、吸気消音器を通してエンジンルームにみちびかれる構造となっている。また、排気は消音器を介して屋根に設けられた排気口から排出された。なお、排気エジェクタ効果を用いて排気消音器外面の温度を下げるのと同時に、排気温度を下げるように設計されている。このほか制御用空気源を除く潤滑油ポンプや車両用補機類の駆動は全てガスタービンでまかなうように改造された。図 2 にガスタービン試験車の機器配置を示す。

4. 本線走行試験

本線走行試験は昭和 45 年 7 月 14 日～17 日の 4 日間にわたり、磐越東線「郡山」～「大越」間の 31.2 km の上り列車（上り勾配）で行われた。ガスタービン試験車はキハ 58 形ディーゼル動車を負荷として連結して走行した。但し、試験列車の最高速度は 130 km/hr で設計されたが走行試験は線路条件から 85 km/hr に押さえられた。

4.1 試験項目

本線走行試験における主な試験項目は、(1)普通発進やストール発進における起動試験、(2)再力行試験、(3)トンネル通過時やトンネル内起動等の圧力、温度を計測するトンネル試験、(4)勾配区間での各部の熱平衡試験、(5)走行時、起動中、トンネル内等での車内や車外における騒音試験等を実施した。

4.2 試験結果

ガスタービンは部分負荷で運転したこともあるが、大きなトラブルもなく試験を終了した。騒音レベルは特別大きな吸排気消音器を用いなくてもディーゼル動車並かそれ以下となった。燃費はディーゼルよりも悪いが動力伝達機構等を適切にすればディーゼルの 1.1～1.2 倍程度に改善できる見通しがついた。トンネル内の走行においても吸排気等の温度は変わらず、ガスタービン列車の向きを変えてもほとんど問題がなかった。但し、トンネル内での起動時に排気が吸気に循環することがわかった。

5. おわりに

ガスタービン列車はいろいろと研究され、海外では実際に運行されていたが、今日ではガスタービン列車の話をもほとんど聞かなくなったことは非常に残念である。

しかし、当事業部では私を含めて当時この運転試験に関わり、実際に実験車を運転した者も数名おり、この当時いろいろな適用試験を行ってきた経験が今の私どもの製品開発に役立っていると思う。最後に、当時の関係各位には多大なるご支援を賜り、この紙面を借りて謝意を表したい。

参考文献

- (1) ガスタービン列車の研究, 川崎技報 40 号, (昭 46-1), p 67

定款変更に関するお知らせ

第24期理事会

本会は、1972年6月15日に日本ガスタービン会議として創立され、1976年6月4日に日本ガスタービン学会として社団法人になり、四分の一世紀以上を過ぎ、新たな展開を始める時期となりました。

現在の学会を取り巻く状況を考えると、エネルギー・環境に対して当学会の果たす役割は重要であります。現在の事業内容にあわせて、本会の「目的」第4条を変更するとともに、より効率的運営を目指して、定款変更をすることと致しました。

また、本会の監督官庁である文部省より、「公益法人の設立許可及び指導監督基準の運用指針（平成9年3月7日付）」に則った定款変更をするよう通達がありました。

同通達では、総会成立要件として民法上の社員（本会では正会員）の過半数（委任状を含む）の出席を要すること、役員の任期は2年であること、役員は総会で選任されること等が提示されています。

さらに、文部省「7学情第10号（平成7年3月29日付）」により、会費等の条項を細則に移行するよう指導を受けており、「入会金及び会費」第8条を変更することに致しました。

以上により、組織検討委員会の結論を基に定款の変更を準備し、2000年4月20日に通常総会を開催し審議して頂く予定としております。

以下に、現行の定款と変更案を対比して掲げますので、ご覧頂き、ご意見・ご質問を4月1日までに文書で頂ければ幸いです。

社団法人 日本ガスタービン学会 定款（現行）	変 更 案
第 1 章 総則 （名 称） 第1条 この法人は、社団法人日本ガスタービン学会という。 （事務所） 第2条 この法人は、事務所を東京都新宿区西新宿7丁目5番13号におく。 （支 部） 第3条 この法人は、理事会の議決を経て必要の地に支部を置くことができる。 第 2 章 目的及び事業 （目 的） 第4条 この法人は、ガスタービンに関する研究発表・調査・知識の交換並びに会員相互間及び関連学協会との連絡・提携を図り、もって学術・技術の発展に寄与することを目的とする。 （事 業） 第5条 この法人は、前条の目的を達成するため次の事業を行なう。 (1) 研究発表会及び学術講演会等の開催 (2) 学会誌及び学術図書の刊行 (3) 内外関連学協会との連絡並びに協力 (4) ガスタービンに関する研究・調査 (5) 研究の奨励及び研究業績の表彰 (6) その他前条の目的を達するために必要な事業 第 3 章 会員 （会員の種類） 第6条 この法人の会員は、次のとおりとする。 (1) 正会員 この法人の目的に賛同する個人 (2) 賛助会員 この法人の目的に賛同し、事業を援助する団体 (3) 学生会員 この法人の目的に賛同する大学院、大学又は高等専門学校（これに準ずる施設を含む）の在学学生 (4) 名誉会員 ガスタービン及び関連技術に関し功績顕著な者又はこの法人に対し特に功勞のあった者のうちから、理事会の推薦により総会において承認された者 （入 会） 第7条 会員になろうとする者は、入会金及び会費を添えて入会申込書を提出し、理事会の承認を受けなければならない。ただし、名誉会員に推薦された者は、入会の手続きを要せず、本人の承諾をもって会員となるものとする。	第 1 章 総則 （名 称） 第1条 同文 （事務所） 第2条 同文 （支 部） 第3条 同文 第 2 章 目的及び事業 （目 的） 第4条 この法人は、ガスタービンに関する研究発表・調査・知識の交換並びに会員相互間及び関連学協会との連絡・提携を図り、もって学術・技術の発展及び人類社会の福祉と発展に寄与することを目的とする。 （事 業） 第5条 同文 第 3 章 会員 （会員の種類） 第6条 同文 （入 会） 第7条 この法人に入会するには、定款第4条に掲げる目的に賛同し、入会金及び会費を添えて入会申込書を提出し、理事会の承認を受けなければならない。ただし、名誉会員に推薦された者は、入会の手続きを要せず、本人の承諾をもって会員となるものとする。

(入会金及び会費)

第8条 この法人の入会金は、次のとおりとする。

- (1) 正会員 500円
- (2) 賛助会員 1,000円
- (3) 学生会員 500円

2 この法人の会費は、次のとおりとする。

- (1) 正会員 年額 5,000円
- (2) 賛助会員 年額 1070,000円

とし、1口以上

- (3) 学生会員 年額 2,500円

3 名誉会員は、入会金及び会費を納めることを要しない。

4 会員は、会費を所定の期日までに納入しなければならない。

5 既納の入会金および会費は、いかなる理由があっても返還しない。

(会員の権利)

第9条 会員は、この法人が刊行する学会誌の配付を受けるほか、この法人の行なう全ての事業に参加する資格を有する。

2 正会員は、この定款及び別に定めるところにより、選挙権及び被選挙権を有する。

(会員の資格喪失)

第10条 会員は、次の事由によってその資格を喪失する。

- (1) 退会
- (2) 禁治産者若しくは準禁治産者又は破産の宣告
- (3) 死亡、失踪宣告並びに賛助会員である団体の解散
- (4) 除名

(退会)

第11条 会員が退会しようとするときは、理由を付して退会届を会長に提出しなければならない。

第12条 会員が次の各号の一に該当するときは、総会において出席者の4分の3以上の同意を得て、会長がこれを除名することができる。

- (1) 会費を1年以上滞納したとき
- (2) この法人の会員としての義務に違反したとき
- (3) この法人の名誉を傷つけ又はこの法人の目的に違反する行為があったとき

第4章 役員・評議員及び職員

(役員)

第13条 この法人には、次の役員を置く。

- (1) 理事 10名以上20名以内（うち会長1名、副会長1名）
- (2) 監事 2名

(評議員)

第14条 この法人に、評議員を60名以上70名以内置く。

(役員の選任)

第15条 役員は、総会で正会員の中から選任する。役員の選任方式については、総会において定める。

2 監事は、他の役員を兼ねることができない。

(評議員の選任)

第16条 評議員は、正会員の中から正会員の投票で選挙する。

2 評議員は、役員を兼ねることができない。

(理事の職務)

第17条 会長は、この法人の業務を総理し、この法人を代表する。

2 副会長は、会長を補佐し、会長に事故があるとき又は会長が欠けたときは、その職務を代行する。

3 理事は、理事会を組織して、この定款に定めるもののほか、この法人の総会及び評議員会の権限に属せしめられた事項以外の事項を議決し、執行する。

(監事の職務)

第18条 監事は、民法第59条の職務を行う。

(評議員の職務)

第19条 評議員は、評議員会を通じ会務の運営に参加する。

(役員の任期)

(入会金及び会費)

第8条 会員は別に定める会費を支払わなければならない。

第9条 入会金及び会費は別に定める。

2 名誉会員は、入会金及び会費を納めることを要しない。

3 既納の入会金及び会費は、返還しない。

(現行第8条の金額の部分の細則に移行)

(会員の権利)

第10条 現行第9条同文

(会員の資格喪失)

第11条 会員は、次の事由によってその資格を喪失する。

- (1) 退会
- (2) 禁治産者若しくは準禁治産者又は破産の宣告
- (3) 死亡、失踪宣告並びに賛助会員である団体の解散
- (4) 一定期間以上の会費の滞納
- (5) 除名

(退会)

第12条 会員が退会するには、理由を付して退会届を会長に提出しなければならない。

第13条 会員が、次の各号の一に該当するときは、理事会の議決を経て、総会において出席者の3分の2以上の議決により、会長がこれを除名することができる。

(第1項削除。以下番号繰上げ)

- (1) この法人の会員としての義務に違反したとき
- (2) この法人の名誉を傷つけ又はこの法人の目的に違反する行為があったとき

第4章 役員・評議員及び職員

(役員)

第14条 現行第13条同文

(評議員)

第15条 この法人に、評議員を60名以上80名以内置く。

(役員の選任)

第16条 役員は、以下の手続きにより選出する。

- (1) 理事は、正会員の中から通常総会で選任する。選出方法は、別に定める。
- (2) 監事は、正会員の中から正会員の投票で選出し、通常総会で承認する。
- (3) 理事及び監事は、相互に兼ねることができない。

(評議員の選任)

第17条 評議員は、正会員の中から正会員の投票で選出する。

2 評議員は、役員を兼ねることができない。

(理事の職務)

第18条 会長は、この法人の業務を総理し、この法人を代表する。

2 副会長は、会長を補佐し、会長に事故があるとき又は会長が欠けたときは、その職務を代行する。

3 理事は、理事会を組織して、この定款に別に定めるもののほか、この法人の総会及び評議員会の権限に属せしめられた事項以外の事項を議決し、執行する。

(監事の職務)

第19条 現行第18条同文

(評議員の職務)

第20条 現行第19条同文

(役員の任期)

第 20 条 この法人の役員の任期は、通常総会から次の通常総会までとし、再任を妨げない。

2 補欠により選任された役員の任期は、前任者又は現任者の残任期間とする。

3 役員は、その任期満了後でも後任者が就任するまでは、その職務を行う。

(評議員の任期)

第 21 条 この法人の評議員の任期は、通常総会の議事を審議する評議員会から次の同評議員会までとし、再任を妨げない。

(役員及び評議員の解任)

第 22 条 この法人の役員及び評議員が次の各号の一に該当するときは、その任期中であっても総会、理事会及び評議員会において各々現在数の 3 分の 2 以上の議決により、これを解任することができる。

(1) 心身の故障のため職務の執行に耐えないとき

(2) 職務上の義務違反その他役員としてふさわしくない行為があったとき

(役員及び評議員の報酬)

第 23 条 この法人の役員及び評議員は、無報酬とする。ただし、会務のために要した費用は支弁する。

(顧問)

第 24 条 この法人に、顧問を置くことができる。

2 顧問は、理事会の推薦により総会の承認を得るものとする。

3 顧問は、この法人の運営に関する重要事項について会長の諮問に応ずる。

(事務局)

第 25 条 この法人の事務を処理するため事務局を設け、事務局長 1 名を含む所要の職員を置く。

2 事務局長及びその他の職員は、会長が任免する。

3 職員は、会長の定めた職務に従事する。

4 職員は、有給とする。

第 5 章 会議

(会議の種類)

第 26 条 この法人の会議は、総会・理事会・評議員会とし、総会は通常総会・臨時総会とする。

2 総会は、正会員をもって組織する。

3 理事会は、理事をもって組織する。

4 評議員会は、評議員をもって組織する。

(総会の招集)

第 27 条 通常総会は、毎会計年度終了後 2 月以内に会長が招集する。

2 臨時総会は、理事会・評議員会又は監事が必要と認めたとき、会長が招集する。また会長は 5 分の 1 以上の正会員から会議の目的である事項を示した書面によって請求のあったときは、20 日以内にこれを招集しなければならない。

3 総会を招集するには、少なくとも 14 日以前に会議の目的である事項・日時及び場所を記載した書面をもって正会員に通知しなければならない。

(総会の議長)

第 28 条 通常総会の議長は、会長とし、臨時総会の議長は、正会員の互選で定める。

(総会の議決事項)

第 29 条 総会は、この定款に別に定めるもののほか、次の事項を議決する。

(1) 事業計画及び収支予算についての事項

(2) 事業報告及び収支決算についての事項

(3) 財産目録及び貸借対照表についての事項

(4) 前各号のほか、理事会及び評議員会が必要と認めた事項

(総会の議決方法)

第 30 条 総会は、正会員現在数の 5 分の 1 以上の出席がなければ、その議事を開き、議決することができない。ただし当該議事につき、あらかじめ書面をもって意思を表示した者又は表決の委任者は出席者とみなす。

2 総会の議事は、この定款に別段の定めがある場合を除くほか、出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長の決す

第 21 条 役員の任期は、原則として 2 年とする。

ただし、役員の就任日は通常総会開催日とし、再任を妨げない。

2 補欠により選任された役員の任期は、前任者又は現任者の残任期間とする。

3 役員は、その任期満了後でも後任者が就任するまでは、その職務を行う。

(評議員の任期)

第 22 条 評議員の任期は、通常総会の議事を審議する評議員会から次の同評議員会までとし、再任を妨げない。(この法人の、を削除)

(役員及び評議員の解任)

第 23 条 役員及び評議員が次の各号の一に該当するときは、その任期中であっても理事会、評議員会及び総会において各々現在数の 3 分の 2 以上の議決により、これを解任することができる。(この法人の、を削除)

(1) 心身の故障のため、職務の執行に耐えないとき

(2) 職務上の義務違反、その他役員または評議員としてふさわしくない行為があったとき

(役員及び評議員の報酬)

第 24 条 役員及び評議員は、無報酬とする。ただし、会務のために要した費用は支弁する。(この法人の、を削除)

(顧問)

第 25 条 現行第 24 条同文

(事務局)

第 26 条 現行第 25 条同文

第 5 章 会議

(会議の種類)

第 27 条 現行第 26 条同文

(総会の招集)

第 28 条 現行第 27 条同文

(総会の議長)

第 29 条 現行第 28 条同文

(総会の議決事項)

第 30 条 現行第 29 条同文

(総会の議決方法)

第 31 条 総会は、正会員現在数の過半数の出席がなければ、その議事を開き、議決することができない。ただし、総会に出席できない正会員は、書面をもって他の正会員に委任することができる。この場合あらかじめ通知した事項については、出席者とみなす。

2 総会の議事は、この定款に別段の定めがある場合を除き、出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長が決する。

るところによる。

(理事会の招集)

第 31 条 理事会は、毎年 8 回会長が招集する。ただし、会長が必要と認めたとき又は理事現在数の 3 分の 1 以上から会議の目的である事項を示した書面によって請求のあったときは、会長は 20 日以内にこれを招集しなければならない。

2 理事会を招集するには、少なくとも 14 日以前に会議の目的である事項、日時及び場所を記載した書面をもって理事に通告しなければならない。

(理事会の議長)

第 32 条 理事会の議長は、会長とする。

(理事会の議決事項)

第 33 条 理事会は、この定款に定めるもののほか、次の事項を議決する。

- (1) 総会に提案すべき事項
- (2) 会務の執行に関する事項
- (3) その他、会長が必要と認めた事項

(理事会の議決方法)

第 34 条 理事会は、理事現在数の 3 分の 2 以上の出席がなければ議事を開き議決することができない。ただし、当該議事につきあらかじめ書面をもって意思を表示した者又は表決の委任者は出席とみなす。

2 理事会の議事は、この定款に別段の定めがある場合を除くほか、出席理事の過半数をもって決し、可否同数のときは、議長の決するところによる。

(評議員会の招集)

第 35 条 評議員会は、会長が招集する。ただし会長は評議員現在数の 3 分の 1 以上から会議の目的である事項を示した書面によって請求のあったときはこれを招集しなければならない。

2 評議員会を招集するには少なくとも、14 日以前に会議の目的である事項、日時及び場所を記載した書面をもって評議員に通知しなければならない。

(評議員会の議長)

第 36 条 評議員会の議長は、評議員の互選で定める。

(評議員会の議決事項)

第 37 条 評議員会は、この定款に定めるもののほか、次の事項を議決する。

- (1) 総会に提案すべき事項
- (2) 理事会が必要と認めた事項
- (3) 会務の運営に必要な事項

(評議員会の議決方法)

第 38 条 評議員会は、評議員現在数の 2 分の 1 以上が出席しなければ議事を開き議決することができない。ただし、当該議事につきあらかじめ書面をもって、意思を表示した者又は表決の委任者は出席者とみなす。

2 評議員会の議事は、この定款の別段の定めがある場合を除くほか、出席評議員の過半数をもって決し、可否同数のときは、議長の決するところによる。

(会員への議事の通知)

第 39 条 総会・理事会及び評議員会の議事の要領及び議決した事項は、会員に通知する。

(議事録)

第 40 条 この法人の会議の議事については、議事録を作成し、議長及び出席者代表 2 名以上が署名捺印の上、これを保存する。

第 6 章 資産及び会計

(資産の構成)

第 41 条 この法人の資産は、次のとおりとする。

- (1) 設立当初の財産目録に記載された財産
- (2) 入会金及び会費
- (3) 事業に伴う収入
- (4) 資産から生ずる果実
- (5) 寄附金品
- (6) その他の収入

(資産の種別)

第 42 条 この法人の資産を分けて、基本財産及び運用財産の二

(理事会の招集)

第 32 条 理事会は、毎年 6 回以上会長が招集する。ただし、会長が必要と認めたとき又は理事現在数の 3 分の 1 以上から会議の目的である事項を示した書面によって請求のあったときは、会長は 20 日以内にこれを招集しなければならない。

2 理事会を招集するには、少なくとも 14 日以前に会議の目的である事項、日時及び場所を記載した書面をもって理事に通告しなければならない。

(理事会の議長)

第 33 条 現行第 32 条同文

(理事会の議決事項)

第 34 条 理事会は、次の事項を議決する。(この定款に定めるもののほか、を削除)

- (1) 総会に提案すべき事項
- (2) 会務の執行に関する事項
- (3) その他、会長が必要と認めた事項

(理事会の議決方法)

第 35 条 理事会は、理事現在数の 3 分の 2 以上の出席がなければ、その議事を開き、議決することができない。ただし、理事会に出席できない理事は、書面をもって他の理事に委任することができる。この場合あらかじめ通知した事項については、出席者とみなす。

2 理事会の議事は、この定款に別段の定めがある場合を除き、出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長が決する。

(評議員会の招集)

第 36 条 現行第 35 条同文

(評議員会の議長)

第 37 条 現行第 36 条同文

(評議員会の議決事項)

第 38 条 評議員会は、次の事項を議決する。(この定款に定めるもののほか、を削除)

- (1) 総会に提案すべき事項
- (2) 理事会が必要と認めた事項
- (3) 会務の運営に必要な事項

(評議員会の議決方法)

第 39 条 評議員会は、評議員現在数の 2 分の 1 以上の出席がなければ、その議事を開き、議決することができない。ただし、評議員会に出席できない評議員は、書面をもって他の評議員に委任することができる。この場合あらかじめ通知した事項については、出席者とみなす。

2 評議員会の議事は、この定款に別段の定めがある場合を除き、出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長が決する。

(会員への議事の通知)

第 40 条 理事会・評議員会及び総会の議事の要領及び議決した事項は、会員に通知する。

(議事録)

第 41 条 会議の議事については、議事録を作成し、議長及び出席者代表 2 名以上が署名捺印の上、これを保存する。(この法人の、を削除)

第 6 章 資産及び会計

(資産の構成)

第 42 条 現行第 41 条同文

(資産の種別)

第 43 条 資産を分けて、基本財産及び運用財産の二種とする。(こ

種とする。

2 基本財産は、次に掲げるものをもって構成する。

- (1) 設立当初の財産目録の中、基本財産の部に記載された資産
- (2) 基本財産とすることを指定して寄附された財産
- (3) 理事会で基本財産に繰り入れることを議決した財産

3 運用財産は基本財産以外の資産とする。

(資産の管理)

第 43 条 この法人の資産は、理事会の議決に基づいて会長が管理し、基本財産のうち現金は、理事会の議決を経て定期預金とする等、確実な方法により会長が保管する。

(基本財産の処分の制限)

第 44 条 基本財産は、譲渡し、交換し、担保に供し、又は運用財産に繰り入れてはならない。ただし、この法人の事業遂行上やむを得ない理由があるときは、総会・理事会及び評議員会の議決を経て、かつ文部大臣の承認を受けて、その一部に限りこれらの処分をすることができる。

(経費の支弁)

第 45 条 この法人の事業遂行に要する経費は、運用財産をもって支弁する。

(事業計画及び収支予算)

第 46 条 この法人の事業計画及びこれに伴う収支予算は、会長が編成し、総会・理事会及び評議員会の議決を経て毎会計年度開始前に、文部大臣に届け出なければならない。事業計画及び収支予算を変更しようとする場合も同様である。

(事業報告及び収支決算)

第 47 条 この法人の事業報告書・収支決算書・財産目録・貸借対照表及び財産増減事由書並びに会員の異動状況書は会長が作成し、監事の意見を付けて総会・理事会及び評議員会の承認を経て、毎会計年度終了後3月以内に文部大臣に報告しなければならない。

2 この法人の収支決算に剰余金があるときは、総会・理事会及び評議員会の議決を経て、その一部若しくは全部を基本財産に編入し又は翌年度に繰り越すものとする。

(新たな義務の負担等)

第 48 条 第44条ただし書及び前条の規定に該当する場合並びに収支予算で定めるものを除くほか、新たな義務の負担又は権利の放棄のうち、重要なものを行おうとするときは総会・理事会及び評議員会の議決を経なければならない。

(長期借入金)

第 49 条 この法人が資金の借入れをしようとするときは、その会計年度の収入をもって償還する短期借入金を除き、総会・理事会及び評議員会の議決を経、かつ文部大臣の承認を受けなければならない。

(会計年度)

第 50 条 この法人の会計年度は、毎年4月1日に始まり、翌年3月31日に終る。

第 7 章 定款の変更並びに解散

(定款の変更)

第 51 条 この定款は、総会・理事会及び評議員会において各々現在数の3分の2以上の議決を経、かつ文部大臣の認可を受けなければ変更することができない。

(解 散)

第 52 条 この法人の解散は、総会、理事会、評議員会において各々現在数の4分の3以上の議決を経、かつ文部大臣の許可を受けなければならない。

(残余財産の処分)

第 53 条 この法人の解散に伴う残余財産は総会・理事会及び評議員会において各々現在数の4分の3以上の議決を経、かつ文部大臣の許可を受けて、この法人の目的に類似の目的を有する公益法人に寄附するものとする。

第 8 章 補則

(細 則)

第 54 条 この定款施行についての細則は、総会・理事会及び評議員会の議決を経て別に定める。

(書類及び帳簿の備付等)

の法人の、を削除)

2項以下、現行第42条2項以下同文

(資産の管理)

第 44 条 資産は、理事会の議決に基づいて会長が管理し、基本財産のうち現金は、理事会の議決を経て定期預金とする等、確実な方法により会長が保管する。(この法人の、を削除)

(基本財産の処分の制限)

第 45 条 基本財産は、譲渡し、交換し、担保に供し、又は運用財産に繰り入れてはならない。ただし、この法人の事業遂行上やむを得ない理由があるときは、理事会・評議員会及び総会の議決を経、かつ文部大臣の承認を受けて、その一部に限りこれらの処分をすることができる。

(経費の支弁)

第 46 条 事業遂行に要する経費は、運用財産をもって支弁する。

(この法人の、を削除)

(事業計画及び収支予算)

第 47 条 事業計画及びこれに伴う収支予算は、会長が編成し、理事会・評議員会及び総会の議決を経て毎会計年度開始前に、文部大臣に届け出なければならない。事業計画及び収支予算を変更しようとする場合も同様である。(この法人の、を削除)

(事業報告及び収支決算)

第 48 条 事業報告書・収支決算書・財産目録・貸借対照表及び財産増減事由書並びに会員の異動状況書は会長が作成し、監事の意見を付けて理事会・評議員会及び総会の承認を経て、毎会計年度終了後3月以内に文部大臣に報告しなければならない。(この法人の、を削除)

2 収支決算に剰余金があるときは、理事会・評議員会及び総会の議決を経て、その一部若しくは全部を基本財産に編入し又は翌年度に繰り越すものとする。(この法人の、を削除)

(新たな義務の負担等)

第 49 条 第45条ただし書及び前条の規定に該当する場合並びに収支予算で定めるものを除くほか、新たな義務の負担又は権利の放棄のうち、重要なものを行おうとするときは理事会・評議員会及び総会の議決を経なければならない。

(長期借入金)

第 50 条 この法人が資金の借入れをしようとするときは、その会計年度の収入をもって償還する短期借入金を除き、理事会・評議員会及び総会の議決を経、かつ文部大臣の承認を受けなければならない。

(会計年度)

第 51 条 この法人の会計年度は、毎年3月1日に始まり、翌年2月末日に終る。

第 7 章 定款の変更並びに解散

(定款の変更)

第 52 条 この定款は、理事会・評議員会及び総会において、各々現在数の3分の2以上の議決を経、かつ文部大臣の認可を受けなければ変更することができない。

(解 散)

第 53 条 この法人の解散は、理事会、評議員会、総会において、各々現在数の4分の3以上の議決を経、かつ文部大臣の許可を受けなければならない。

(残余財産の処分)

第 54 条 解散に伴う残余財産は理事会・評議員会及び総会において、各々現在数の4分の3以上の議決を経、かつ文部大臣の許可を受けて、この法人の目的に類似の目的を有する公益法人に寄附するものとする。(この法人の、を削除)

第 8 章 補則

(細 則)

第 55 条 この定款施行についての細則は、理事会及び評議員会の議決を経て別に定める。

(書類及び帳簿の備付等)

第 55 条 この法人の事務所に、次の書類及び帳簿を備えなければならない。ただし、総会によりこれらに代る書類及び帳簿を備えたときは、この限りでない。

- (1) 定款
- (2) 会員名簿
- (3) 役員及びその他の職員の名簿及び履歴書
- (4) 財産目録
- (5) 資産台帳及び負債台帳
- (6) 収入・支出に関する帳簿及び証拠書類
- (7) 総会・理事会及び評議員会の議事に関する事項
- (8) 処務日誌
- (9) 官公署往復書類
- (10) その他必要な書類及び帳簿

2 前項の書類及び帳簿は、永久保存としなければならない。ただし、前項第 6 号の帳簿及び書類は 10 年以上、同項 8 号から第 10 号までの帳簿及び書類は 1 年以上保存しなければならない。

附 則

1. 従来日本ガスタービン会議に属した会員及び権利義務の一切は、この法人で継承する。

附 則

1. この定款の変更は、文部大臣の認可の日からこれを施行する。但し第 8 条の会費の金額は、昭和 55 年 4 月 1 日から適用する。
2. 昭和 57 年 6 月 18 日一部変更（第 2 条）
3. 昭和 59 年 7 月 3 日一部変更（第 8 条、第 10 条、第 22 条、第 31 条、第 51 条、第 52 条、第 53 条）。但し第 8 条の会費の金額は昭和 59 年 4 月 1 日から適用する。
4. 平成 2 年 8 月 28 日一部変更（第 8 条）。但し第 8 条の会費の金額は平成 2 年 4 月 1 日から適用する。

第 56 条 現行第 55 条同文

附 則

従来日本ガスタービン会議に属した会員及び権利義務の一切は、この法人で継承する。

附 則

1. この定款の変更は、文部大臣の認可のあった日（平成 年 月 日）から施行する。
2. 定款第 21 条第 1 項の規定にかかわらず、平成 12 年 4 月に招集する通常総会で選任する理事のうち半数の任期は 1 年とする。
3. 定款第 51 条の規定にかかわらず、平成 12 年度（第 25 期）は平成 12 年 4 月 1 日から平成 13 年 2 月 28 日までとする。

定款改正

1. 昭和 55 年 5 月 7 日一部変更（第 2 条、第 8 条、第 20 条、第 21 条）。ただし、第 8 条の会費の金額は、昭和 55 年 4 月 1 日から適用する。
2. 昭和 57 年 6 月 18 日一部変更（第 2 条）
3. 昭和 59 年 7 月 3 日一部変更（第 8 条、第 10 条、第 22 条、第 31 条、第 51 条、第 52 条、第 53 条）。ただし、第 8 条の会費の金額は昭和 59 年 4 月 1 日から適用する。
4. 平成 2 年 8 月 28 日一部変更（第 8 条）。ただし、第 8 条の会費の金額は平成 2 年 4 月 1 日から適用する。

第28回ガスタービンセミナー報告

橋本 良作

HASHIMOTO Ryosaku

平成12年1月20日、21日の2日間にわたり、第28回ガスタービンセミナーが浜松町の東京ガス(株)本社大会議室にて、154名の受講者を得て盛大に開催されました。

来年21世紀を迎えるにあたって“地球環境保全”と“資源の有効利用”という社会的要請はその重要度が益々増してくると思われます。このような状況にあって、ガスタービンはこれにどう対応していくのか、この観点から「21世紀を担うガスタービンを目指して」をメインテーマとして掲げました。

第1日目には「分散電源としての活躍が期待されるマイクロガスタービンと燃料電池」をサブテーマに系統から見た分散型電源の大規模導入のための技術課題、分散型電源としての固体高分子型燃料電池の開発状況、分散型や火力代替型の高効率複合発電を目指した熔融炭酸塩型燃料電池発電技術の開発、300kW級マイクロガスタービンを使ったコージェネシステムの開発、マイクロガスタービンを使用したコージェネレーションシステムの概要、市場導入の意義及び課題等についての講演。

翌2日目は「21世紀に向けてのガスタービン最新技術」をサブテーマとして、航空用ガスタービンの先端技

術として航空用エンジンの低NO_x燃焼技術の実用化とその課題及び関連技術、Ni基超合金開発を中心にガスタービン用耐熱材料の開発現状と今後の方向について国内及び欧米の材料開発のプロジェクトについての現状、ガスタービンの再熱燃焼サイクルの先端技術、1500℃級ガスタービンの開発とその運転実績、一軸型ガスタービンコンバインドサイクルプラントの先端技術についての講演を行っていただきました。

いずれも、興味深い内容と最新の技術動向を盛り込まれた内容であり、受講された皆様の興味をさそい、講演毎に活発な質疑がなされましたことは、今回のテーマに対する関心の高さを示すものでありました。

なお、本セミナー終了後に、企画、運営等に関するアンケートを集計させていただきましたので、今後の企画に反映させて行きたいと考えています。

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

(航空宇宙技術研究所、企画委員)

○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
ガス燃料及びガスを燃料とする 原動機	H 12/4/24 主婦会館	日本内燃機関連合会事務局 担当 青木、田山、波多野 TEL 03-3574-7882 FAX 03-3574-7883
第8回アジア学術会議－科学者 フォーラム	H 12/5/13-18 ホテルニューオータニ、東京国際フォーラム	日本学術会議事務局学術部情報国際課国際交流係 TEL 03-3403-6291 EX 2452, 2456 FAX 03-3403-1982
第64回マリンエンジニアリン グ学術講演会	H 12/5/16-17 東京商船大学・越中島会館	日本船用機関学会 TEL 03-5396-0461 FAX 03-5396-0462
平成12年度（第8回）可視化 情報講座	H 12/5/16-6/9 東京電機大学神田キャンパス	学務部学事課 担当 渡辺、小嶋 TEL 03-5280-3555 FAX 03-5280-3623
第240回講習会 駆動・伝動要 素技術の基礎と実際	H 12/5/25-26 大阪科学技術センター8階 中ホール	日本機械学会関西支部 TEL 06-6443-2073 FAX 06-6443-6049
分散型発電設備－21世紀のコ ージェネレーションシステム－	H 12/5/26 日本機械学会 会議室	日本機械学会 担当 野地礼子 TEL 03-5360-3505 FAX 03-5360-3509
結晶粒微細化への新アプローチ	H 12/6/20-21 工学院大学 新宿校舎	日本金属学会 TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312
第28回可視化情報シンポジウム	H 12/7/17-19 工学院大学 新宿校舎	可視化情報学会事務局 TEL 03-5993-5020 FAX 03-5993-5026
第16回内燃機関シンポジウム	H 12/9/12-14 明治大学リバティータワー	日本機械学会 担当 高橋正彦 TEL 03-5360-3505 FAX 03-3560-3509
第38回燃焼シンポジウム	H 12/11/29-12/1 アクロス福岡	九州大学大学院工学研究科機械科学専攻 第38回燃焼シンポジウム事務局 TEL 092-642-3467(城戸) 3404(村瀬) 3468(北川) FAX 092-641-9744

第28回ガスタービンセミナー報告

橋本 良作

HASHIMOTO Ryosaku

平成12年1月20日、21日の2日間にわたり、第28回ガスタービンセミナーが浜松町の東京ガス(株)本社大會議室にて、154名の受講者を得て盛大に開催されました。

来年21世紀を迎えるにあたって“地球環境保全”と“資源の有効利用”という社会的要請はその重要度が益々増してくると思われます。このような状況にあって、ガスタービンはこれにどう対応していくのか、この観点から「21世紀を担うガスタービンを目指して」をメインテーマとして掲げました。

第1日目には「分散電源としての活躍が期待されるマイクロガスタービンと燃料電池」をサブテーマに系統から見た分散型電源の大規模導入のための技術課題、分散型電源としての固体高分子型燃料電池の開発状況、分散型や火力代替型の高効率複合発電を目指した熔融炭酸塩型燃料電池発電技術の開発、300kW級マイクロガスタービンを使ったコージェネシステムの開発、マイクロガスタービンを使用したコージェネレーションシステムの概要、市場導入の意義及び課題等についての講演。

翌2日目は「21世紀に向けてのガスタービン最新技術」をサブテーマとして、航空用ガスタービンの先端技

術として航空用エンジンの低NO_x燃焼技術の実用化とその課題及び関連技術、Ni基超合金開発を中心にガスタービン用耐熱材料の開発現状と今後の方向について国内及び欧米の材料開発のプロジェクトについての現状、ガスタービンの再熱燃焼サイクルの先端技術、1500℃級ガスタービンの開発とその運転実績、一軸型ガスタービンコンバインドサイクルプラントの先端技術についての講演を行っていただきました。

いずれも、興味深い内容と最新の技術動向を盛り込まれた内容であり、受講された皆様の興味をさそい、講演毎に活発な質疑がなされましたことは、今回のテーマに対する関心の高さを示すものでありました。

なお、本セミナー終了後に、企画、運営等に関するアンケートを集計させていただきましたので、今後の企画に反映させて行きたいと考えています。

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

(航空宇宙技術研究所、企画委員)

○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
ガス燃料及びガスを燃料とする 原動機	H 12/4/24 主婦会館	日本内燃機関連合会事務局 担当 青木、田山、波多野 TEL 03-3574-7882 FAX 03-3574-7883
第8回アジア学術会議－科学者 フォーラム	H 12/5/13-18 ホテルニューオータニ、東京国際フォーラム	日本学術会議事務局学術部情報国際課国際交流係 TEL 03-3403-6291 EX 2452, 2456 FAX 03-3403-1982
第64回マリンエンジニアリン グ学術講演会	H 12/5/16-17 東京商船大学・越中島会館	日本船用機関学会 TEL 03-5396-0461 FAX 03-5396-0462
平成12年度(第8回)可視化 情報講座	H 12/5/16-6/9 東京電機大学神田キャンパス	学務部学事課 担当 渡辺、小嶋 TEL 03-5280-3555 FAX 03-5280-3623
第240回講習会 駆動・伝動要 素技術の基礎と実際	H 12/5/25-26 大阪科学技術センター8階 中ホール	日本機械学会関西支部 TEL 06-6443-2073 FAX 06-6443-6049
分散型発電設備－21世紀のコ ージェネレーションシステム－	H 12/5/26 日本機械学会 会議室	日本機械学会 担当 野地礼子 TEL 03-5360-3505 FAX 03-5360-3509
結晶粒微細化への新アプローチ	H 12/6/20-21 工学院大学 新宿校舎	日本金属学会 TEL 022-223-3685 FAX 022-223-6312
第28回可視化情報シンポジウム	H 12/7/17-19 工学院大学 新宿校舎	可視化情報学会事務局 TEL 03-5993-5020 FAX 03-5993-5026
第16回内燃機関シンポジウム	H 12/9/12-14 明治大学リバティータワー	日本機械学会 担当 高橋正彦 TEL 03-5360-3505 FAX 03-3560-3509
第38回燃焼シンポジウム	H 12/11/29-12/1 アクロス福岡	九州大学大学院工学研究科機械科学専攻 第38回燃焼シンポジウム事務局 TEL 092-642-3467(城戸) 3404(村瀬) 3468(北川) FAX 092-641-9744

1999 年度第 3 回見学会および技術フォーラム報告

長谷川 好道

HASEGAWA Yoshimichi

平成 12 年 2 月 18 日(金)に東邦ガス株式会社総合技術研究所で見学会および技術フォーラムが開催された。本企画へ多大の興味が示され、参加人員は募集人数の 50 名を満たす盛況さであった。

開催に先立ち、速水地方委員会委員長より今回の見学にお骨折り頂いた東邦ガス(株)殿にたいし謝辞が述べられた。引き続き東邦ガス(株)都市エネルギー技術開発部トータルエネルギーシステム技術グループ総括、雨宮次長殿のご挨拶と総合技術研究所の組織説明があった。

当総合研究所は、技術企画部、基盤技術研究部、都市エネルギー技術開発部から成り立っており、大きく分けて、基礎的な研究に取り組む部門と商品化に近い物あるいは商品化をめざして開発を進める部門との 2 部門があるとのことである。

見学は参加者を A、B 2 班に分け、ガスエネルギー館見学とマイクロガスタービンの実機説明・見学が行われた。ガスエネルギー館では超低温での物性変化、LNG 輸送方法、ガス器具の地震安全対策等につき、易しく目で見て解るように設定された施設を見学した。

マイクロガスタービンは、東邦ガス、東京ガス、大阪ガス、トヨタタービンアンドシステム (TTS) 4 社の共同開発によるコ・ジェネレーションシステムの実証試験

に使用されているトヨタの 300 kW 級のガスタービンの見学を行った。システムはガスタービン発電セットとして商用電源との系統連系を行い、排ガスは廃熱ボイラーにより蒸気を発生しトータル熱効率の向上を計っている。NOx 対策としては蒸気噴射にて対応している。現場にて TTS 樋口役員によるガスタービンおよびシステムの説明があり、質疑応答が活発に行われた。

続いて技術フォーラムに移り、下記のテーマについて話題提供を頂き質疑応答が行われた。フォーラムでは時間が不足し、十分な討論が出来なかった点は次回企画への反省と考えている。

(1) ガスタービン用高速発電機の概要

神鋼電機(株) 富山 忠信氏

(2) ガスタービン用再生器

住友精密工業(株) 江田 隆志氏

(3) 気体軸受の特徴と応用

NTN(株) 藤川 芳夫氏

最後に、ご多忙中のところ、見学のお世話をいただきました東邦ガス(株)および技術フォーラムで話題提供いただきました方々に厚くお礼申し上げます。

(ダイハツディーゼル(株)、地方委員会委員)

▶ 入 会 者 名 簿 ◀

〔 正 会 員 〕		吉 野 隆(川 重)	〔学生会員から正会員へ〕	旭 プ レ ス 工 業 (株)
土 屋 元 芳(I H I)	野 村 卓 三(全 日 空)	伊 藤 亨(日 立)	(株)ソフィアプレシジョン	
岩 本 幸 治(阪 大)	二本柳 保(東北電力)	〔賛助会員〕	A E A ハイプロテック(株)	
横 田 和 彦(阪 大)	池 田 英 一(三菱商事工作機械)	全 日 本 空 輸 (株)		

◇ 2000 年度会費納入のお願い ◇

2000 年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、2000 年 4 月 24 日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員	1 口	70,000 円
正 会 員		5,000 円
学生会員		2,500 円

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

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

1999 年度第 3 回見学会および技術フォーラム報告

長谷川 好道

HASEGAWA Yoshimichi

平成 12 年 2 月 18 日(金)に東邦ガス株式会社総合技術研究所で見学会および技術フォーラムが開催された。本企画へ多大の興味が示され、参加人員は募集人数の 50 名を満たす盛況さであった。

開催に先立ち、速水地方委員会委員長より今回の見学にお骨折り頂いた東邦ガス(株)殿にたいし謝辞が述べられた。引き続き東邦ガス(株)都市エネルギー技術開発部トータルエネルギーシステム技術グループ総括、雨宮次長殿のご挨拶と総合技術研究所の組織説明があった。

当総合研究所は、技術企画部、基盤技術研究部、都市エネルギー技術開発部から成り立っており、大きく分けて、基礎的な研究に取り組む部門と商品化に近い物あるいは商品化をめざして開発を進める部門との 2 部門があるとのことである。

見学は参加者を A、B 2 班に分け、ガスエネルギー館見学とマイクロガスタービンの実機説明・見学が行われた。ガスエネルギー館では超低温での物性変化、LNG 輸送方法、ガス器具の地震安全対策等につき、易しく目で見て解るように設定された施設を見学した。

マイクロガスタービンは、東邦ガス、東京ガス、大阪ガス、トヨタタービンアンドシステム (TTS) 4 社の共同開発によるコ・ジェネレーションシステムの実証試験

に使用されているトヨタの 300 kW 級のガスタービンの見学を行った。システムはガスタービン発電セットとして商用電源との系統連系を行い、排ガスは廃熱ボイラーにより蒸気を発生しトータル熱効率の向上を計っている。NOx 対策としては蒸気噴射にて対応している。現場にて TTS 樋口役員によるガスタービンおよびシステムの説明があり、質疑応答が活発に行われた。

続いて技術フォーラムに移り、下記のテーマについて話題提供を頂き質疑応答が行われた。フォーラムでは時間が不足し、十分な討論が出来なかった点は次回企画への反省と考えている。

(1) ガスタービン用高速発電機の概要

神鋼電機(株) 富山 忠信氏

(2) ガスタービン用再生器

住友精密工業(株) 江田 隆志氏

(3) 気体軸受の特徴と応用

NTN(株) 藤川 芳夫氏

最後に、ご多忙中のところ、見学のお世話をいただきました東邦ガス(株)および技術フォーラムで話題提供いただきました方々に厚くお礼申し上げます。

(ダイハツディーゼル(株)、地方委員会委員)

▶ 入 会 者 名 簿 ◀

〔正 会 員〕		吉 野 隆(川 重)	〔学生会員から正会員へ〕	旭 プ レ ス 工 業 (株)
土 屋 元 芳(I H I)	野 村 卓 三(全 日 空)	伊 藤 亨(日 立)	(株)ソフィアプレシジョン	
岩 本 幸 治(阪 大)	二本柳 保(東北電力)	〔賛助会員〕	A E A ハイプロテック(株)	
横 田 和 彦(阪 大)	池 田 英 一(三菱商事工作機械)	全 日 本 空 輸 (株)		

◇ 2000 年度会費納入のお願い ◇

2000 年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、2000 年 4 月 24 日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員	1 口	70,000 円
正 会 員		5,000 円
学生会員		2,500 円

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

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

1999 年度第 3 回見学会および技術フォーラム報告

長谷川 好道

HASEGAWA Yoshimichi

平成 12 年 2 月 18 日(金)に東邦ガス株式会社総合技術研究所で見学会および技術フォーラムが開催された。本企画へ多大の興味が示され、参加人員は募集人数の 50 名を満たす盛況さであった。

開催に先立ち、速水地方委員会委員長より今回の見学にお骨折り頂いた東邦ガス(株)殿にたいし謝辞が述べられた。引き続き東邦ガス(株)都市エネルギー技術開発部トータルエネルギーシステム技術グループ総括、雨宮次長殿のご挨拶と総合技術研究所の組織説明があった。

当総合研究所は、技術企画部、基盤技術研究部、都市エネルギー技術開発部から成り立っており、大きく分けて、基礎的な研究に取り組む部門と商品化に近い物あるいは商品化をめざして開発を進める部門との 2 部門があるとのことである。

見学は参加者を A、B 2 班に分け、ガスエネルギー館見学とマイクロガスタービンの実機説明・見学が行われた。ガスエネルギー館では超低温での物性変化、LNG 輸送方法、ガス器具の地震安全対策等につき、易しく目で見て解るように設定された施設を見学した。

マイクロガスタービンは、東邦ガス、東京ガス、大阪ガス、トヨタタービンアンドシステム (TTS) 4 社の共同開発によるコ・ジェネレーションシステムの実証試験

に使用されているトヨタの 300 kW 級のガスタービンの見学を行った。システムはガスタービン発電セットとして商用電源との系統連系を行い、排ガスは廃熱ボイラーにより蒸気を発生しトータル熱効率の向上を計っている。NOx 対策としては蒸気噴射にて対応している。現場にて TTS 樋口役員によるガスタービンおよびシステムの説明があり、質疑応答が活発に行われた。

続いて技術フォーラムに移り、下記のテーマについて話題提供を頂き質疑応答が行われた。フォーラムでは時間が不足し、十分な討論が出来なかった点は次回企画への反省と考えている。

(1) ガスタービン用高速発電機の概要

神鋼電機(株) 富山 忠信氏

(2) ガスタービン用再生器

住友精密工業(株) 江田 隆志氏

(3) 気体軸受の特徴と応用

NTN(株) 藤川 芳夫氏

最後に、ご多忙中のところ、見学のお世話をいただきました東邦ガス(株)および技術フォーラムで話題提供いただきました方々に厚くお礼申し上げます。

(ダイハツディーゼル(株)、地方委員会委員)

▶ 入 会 者 名 簿 ◀

〔正 会 員〕		吉 野 隆(川 重)	〔学生会員から正会員へ〕	旭 プ レ ス 工 業 (株)
土 屋 元 芳(I H I)	野 村 卓 三(全 日 空)	伊 藤 亨(日 立)	(株)ソフィアプレシジョン	
岩 本 幸 治(阪 大)	二本柳 保(東北電力)	〔賛助会員〕	A E A ハイプロテック(株)	
横 田 和 彦(阪 大)	池 田 英 一(三菱商事工作機械)	全 日 本 空 輸 (株)		

◇ 2000 年度会費納入のお願い ◇

2000 年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚、既に銀行引落しの手続きをなさった方は、2000 年 4 月 24 日貴口座より引落しさせていただきます。

賛助会員	1 口	70,000 円
正 会 員		5,000 円
学生会員		2,500 円

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

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

第1回見学会開催のお知らせ

2000年度第1回見学会を下記の要領で開催いたしますので奮ってご参加ください。

1. 日 時 2000年5月26日(金) 13:00~16:00
2. 見学先 小松ハウメット株式会社 寺井工場
石川県能美郡寺井町字栗生西 61-1
TEL 0761-58-6667
3. 内 容 精密鑄造設備・工場見学
「精密鑄造法について」
小松ハウメット(株) ハンブルトン社長

4. 参加要領

- 1) 定員 50名 (定員超過の場合は抽選)
 - 2) 申込み方法: 下記の申込書に記入の上 FAX または郵送にて学会事務局あてお送り下さい。
 - 3) 参加費: 3000円 (当日お支払い下さい)
- (交通手段) JR 北陸線小松駅 タクシー約 12分
小松空港 タクシー約 15分
(タクシーには寺井町栗生工業団地小松ハウメットと告げてください)

見学会参加申込書

申込締切日 (2000年5月12日) 開催日 (2000年5月26日)

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

氏 名	(会員 No.)		
勤務先			
勤務先所在地	〒		
TEL		FAX	
連絡先	〒		
E-mail			

第6回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

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いたしますので奮ってご参加下さい。

1. 日 時 平成 12 年 7 月 13 日(木), 14 日(金)
2. 場 所 (株)東芝 京浜事業所
(横浜市鶴見区末広町 2-4
JR 鶴見線新芝浦駅下車徒歩 1 分)
3. シンポジウムプログラム (予定)

第 1 日目 (7 月 13 日)

- 10:30~12:00 ガスタービン概論
13:00~14:30 ガスタービンと流体工学
15:00~16:30 工場見学
17:00~19:00 懇親会

第 2 日目 (7 月 14 日)

- 10:30~12:00 ガスタービンと伝熱工学
13:00~14:30 ガスタービンと燃焼工学
15:00~16:30 ガスタービンと制御工学

4. 参加要領

- (1) 定 員: 70 名程度
 - (2) 対象者: 理工系大学, 高等専門学校, 大学院在籍者ならびに若手技術者 (入社 3 年以内)
- 本シンポジウムの詳細及び申込方法等については本誌 5 月号又は学会ホームページ (<http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/gtsj/>) をご覧下さい。

第1回見学会開催のお知らせ

2000年度第1回見学会を下記の要領で開催いたしますので奮ってご参加ください。

1. 日 時 2000年5月26日(金) 13:00~16:00
2. 見学先 小松ハウメット株式会社 寺井工場
石川県能美郡寺井町字栗生西 61-1
TEL 0761-58-6667
3. 内 容 精密鑄造設備・工場見学
「精密鑄造法について」
小松ハウメット(株) ハンブルトン社長

4. 参加要領

- 1) 定員 50名 (定員超過の場合は抽選)
 - 2) 申込み方法: 下記の申込書に記入の上 FAX または郵送にて学会事務局あてお送り下さい。
 - 3) 参加費: 3000円 (当日お支払い下さい)
- (交通手段) JR 北陸線小松駅 タクシー約 12分
小松空港 タクシー約 15分
(タクシーには寺井町栗生工業団地小松ハウメットと告げてください)

見学会参加申込書

申込締切日 (2000年5月12日) 開催日 (2000年5月26日)

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

氏 名	(会員 No.)		
勤務先			
勤務先所在地	〒		
TEL		FAX	
連絡先	〒		
E-mail			

第6回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

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いたしますので奮ってご参加下さい。

1. 日 時 平成12年7月13日(木), 14日(金)
2. 場 所 (株)東芝 京浜事業所
(横浜市鶴見区末広町2-4
JR 鶴見線新芝浦駅下車徒歩1分)
3. シンポジウムプログラム (予定)

第1日目 (7月13日)

- 10:30~12:00 ガスタービン概論
13:00~14:30 ガスタービンと流体工学
15:00~16:30 工場見学
17:00~19:00 懇親会

第2日目 (7月14日)

- 10:30~12:00 ガスタービンと伝熱工学
13:00~14:30 ガスタービンと燃焼工学
15:00~16:30 ガスタービンと制御工学

4. 参加要領

- (1) 定 員: 70名程度
 - (2) 対象者: 理工系大学, 高等専門学校, 大学院在籍者ならびに若手技術者 (入社3年以内)
- 本シンポジウムの詳細及び申込方法等については本誌5月号又は学会ホームページ (<http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/gtsj/>) をご覧下さい。

第25期 (平成12年度) 監事・評議員・役員候補者選挙結果

・監事 (氏名：五十音順・敬称略)			勤務先		氏名		勤務先		番号		氏名		勤務先		番号		氏名		勤務先																																																																						
番号	氏名	勤務先	番号	氏名	勤務先	番号	氏名	勤務先	番号	氏名	勤務先	番号	氏名	勤務先	番号	氏名	勤務先	番号	氏名	勤務先																																																																					
1	有賀 一郎	千葉工業大学	31	宮地 敏雄	東京電機大学	66	斉藤 浩平	東芝エンジニアリング(株)	67	三賢 憲治	東電設計(株)	68	青木 康芳	東北電力(株)	69	加藤 利夫	(株)新潟鉄工所	70	佐々木 直人	日産自動車(株)																																																																					
2	能瀬 弘幸	海洋科学技術センター	32	酒井 俊道	東京理科大学	71	白井 俊一	日本鋼管(株)	72	吉岡 俊彦	日本航空(株)	73	熱田 正房	(株)日立製作所	74	大田 康彦	(株)日立製作所	75	川池 和彦	(株)日立製作所																																																																					
・評議員 (候補者番号順・敬称略)			東京理科大学			早稲田大学			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島汎用機械(株)			(株)荏原製作所			大阪ガス(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			関西電力(株)			(株)コマツ			(株)先進材料利用ガス・エネルギー研究所			全日本空輸(株)			中部電力(株)			トヨタ自動車(株)			東京ガス(株)			東京電力(株)			東京電力(株)			(株)東芝			(株)東芝			(株)東芝			(株)東芝			(株)東芝		
・次点者			東京理科大学			早稲田大学			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島播磨重工業(株)			石川島汎用機械(株)			(株)荏原製作所			大阪ガス(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			川崎重工業(株)			関西電力(株)			(株)コマツ			(株)先進材料利用ガス・エネルギー研究所			全日本空輸(株)			中部電力(株)			トヨタ自動車(株)			東京ガス(株)			東京電力(株)			東京電力(株)			(株)東芝			(株)東芝			(株)東芝			(株)東芝			(株)東芝		
・投票数			843票			評議員			監事			有効票			839			824			無効票			2			10			白票			2			9																																																					

先般第25期評議員ならびに監事の選挙を行いました。開票の結果をご報告いたします。

選挙管理委員長 袁田光弘

第 28 回ガスタービン定期講演会・開催のお知らせ

日本ガスタービン学会（幹事学会）と日本機械学会の共催による第 28 回ガスタービン定期講演会を東京で開催します。多数の会員の方々の参加をお願いいたします。

開催日時 2000 年 6 月 2 日(金) 9:40~17:35

開催場所 東京都立科学技術大学

科学技術交流センター

(東京都日野市旭ヶ丘 6-6)

- ・講演プログラムは本号に掲載されています。
 - ・講演会終了後に、講演会場にて懇親会を開催します。
- 参加登録者は無料ですので、お気軽にご参加ください。

参加登録費 (講演論文集代金を含む)

共催学会正会員 7,000 円

同 学生会員 3,000 円

会 員 外 14,000 円

尚、学生に限り論文集無しで 1,000 円で参加できます。

参加申込方法

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

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

- ・郵便振替 No.00170-9-179578
(社)日本ガスタービン学会
- ・銀行振込 第一勧業銀行西新宿支店
普通 No.067-1703707
(社)日本ガスタービン学会

・現金書留

講演論文集

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

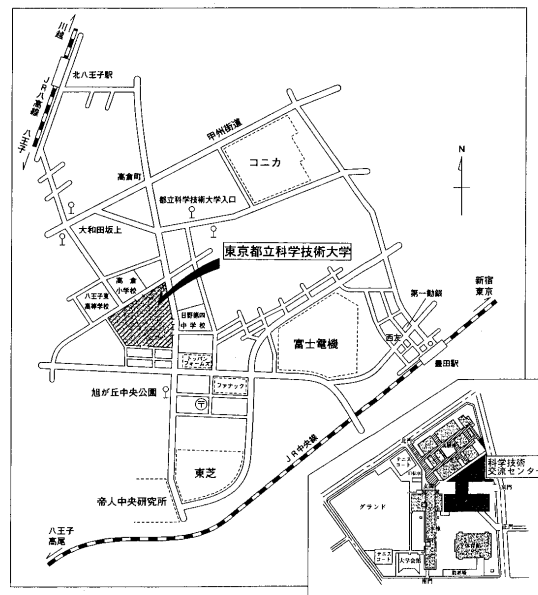
お詫びと訂正

第 27 巻第 6 号 (Vol.27.6) 表紙によせて「J3 エンジン」に以下の誤りがありました。お詫び申し上げます。

通算 449 ページ、左段上から 2 行目

米国ハミルトン社製→米国ウッドワード社製

* 講演会場案内



* 交通案内

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

a) 京王バス (北口バス停)

①平山工業団地行にて約 10 分

旭が丘中央公園下車徒歩 5 分

□豊田駅北口→中央公園前

※③番乗り場、平山工業団地行(豊41)

時								
8	01	08	14	21	28	36	45	57
9	08	19	29	52				

□中央公園前→豊田駅北口

時						
17	01	13	22	34	46	58
18	11	25	34	46	58	
19	09	30	51			
20	12	31	51			

②八王子駅北口行にて約 10 分

都立科学技術大学入口下車、徒歩 7 分

b) タクシーにて約 5 分、又は徒歩 25 分

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

a) 京王バス (いずれの駅も北口バス停)

豊田駅北口行又は日野駅行にて約 15 分

大和田坂上下車徒歩 8 分、約 10 分間隔で運行

b) タクシーにて約 10 分

第28回ガスタービン定期講演会 (都立科技大) プログラム

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

第1室		第2室	
9:40	《一般講演》翼列特性 I 座長：渡辺啓悦 (荏原総研) A-1 超高負荷タービン翼列の翼型が及ぼす性能への影響 (その1) *三田慶一 (法政大)、山本孝正 (航技研)、水木新平、辻田星歩、来摩智哉、水上純一 (法政大) A-2 遷音速翼列の翼間流路における衝撃波挙動の測定 (5枚組翼列の場合) *國平敬之、松下政裕 (都立科技大院)、白鳥敏正、桜井忠一 (都立科技大) A-3 2次空気漏れ流れが翼列性能に及ぼす影響解析 *海野 大、児玉秀和 (石川島播磨)	9:40	《一般講演》燃焼器 I 座長：熊倉弘隆 (日産) B-1 過濃予混合火炎を用いた超小型水素ガスタービン用燃焼器に関する研究 ー火炎安定限界とインジェクタ形状の検討ー *皆川和大、朝日雅博、天日洋二 (都立科技大院)、湯浅三郎 (都立科技大) B-2 広作動域低 NOx ガスタービン燃焼器の特性 下平一雄、黒澤要治、鈴木和雄 (航技研)、*若林 努、守家浩二 (大阪ガス)、 B-3 多成分燃料の火炎温度による NOx 評価法の検討 (要素試験による石炭ガス化中カローリ燃料組成の評価) *林 明典、小泉浩美、小林成嘉 (日立)、長谷川武治、久松 暢、香月靖生 (電中研)
10:55	《一般講演》翼列特性 II 座長：松田 寿 (東芝) A-4 高圧圧縮機初段 (IGV/IRB/ISV) の3次元非定常段解析 *大庭芳則、児玉秀和 (石川島播磨)、野崎 理、西澤敏雄、菊地一雄 (航技研) A-5 軸流圧縮試験機のクロッキングによる特性変化の研究 *小山裕清 (東大院)、町田保男、梶 昭次郎 (東大) A-6 翼列振動制御に向けての空力・構造連成数値解析法の開発 *賀澤順一 (東大院)、渡辺紀徳 (東大)	10:55	《一般講演》燃焼器 II 座長：井亀 優 (船舶技研) B-4 石炭ガス化中カローリ燃焼器の燃焼特性 (希薄拡散方式によるモデル燃焼試験結果) *小泉浩美、林 明典、小林成嘉 (日立)、長谷川武治、久松 暢、香月靖生 (電中研) B-5 石炭ガス化中カローリ燃料用ガスタービン燃焼器の燃焼特性 ー第2報、希薄燃焼による NOx 低減強化型燃焼器の高圧燃焼特性ー *長谷川武治、久松 暢、香月靖生 (電中研)、小泉浩美、林 明典、小林成嘉 (日立) B-6 汚泥消化ガスを燃料とする低 NOx 燃焼器の開発 *吉田智昭、細井 潤、藤 秀実、小林英夫 (石川島播磨)、宮川彰彦 (エンジンリアリング振興協会)
12:20		12:20	

13:20	《特別講演》	「マイクロガスタービンシステムの現状と課題」 井上 梅夫氏(株式会社 タクマ)		座長：湯浅三郎 (都立科技大)
14:20	《一般講演》空力	座長：野崎 理 (航技研)		座長：井上 洋 (日立)
14:30	A-7 脈動流の分岐・合流の研究 (圧力波の位相差が大きい場合) * 後藤康祐、牧野高太郎 (都立科技大院)、千田章生、小西奎二、田代伸一 (都立科技大)	14:30	《一般講演》燃焼・計測	
	A-8 過給機タービン性能予測に与えるウインディング特性の影響 * 渡辺 勇 (都立科技大院)、片桐良一、小西奎二 (都立科技大)、吉識晴夫 (東大生研)、田代伸一 (都立科技大)	15:20	B-7 炭酸ガス回収対応循環型ガスタービンにおける一酸化炭素の反応凍結試算 * 江原拓未 (NEDO)、壹岐典彦、高橋三郎、濱 純 (機械技研)	
15:45	A-9 周期的後流により誘発される乱流スポットの三次元構造に関する研究 船崎健一 (岩手大)、* 小藪栄太郎 (岩手大院)、高橋 潤 (岩手大)		B-8 PIV を用いた周期流れ計測の試み * 山本 武、吉田征二、黒澤要治、五味光男、鈴木和雄 (航技研)	
15:55	《一般講演》伝熱・材料	15:55	《一般講演》ガスタービンシステム	
	A-10 タービン静翼通路面の熱伝達率解析予測 * 佐伯祐志、古閑昭紀、佐々木隆、岡村隆成 (東芝)		B-9 二酸化炭素を主作動流体とするメタン燃料ガスタービンサイクルの検討 * 横山知子 (都立科技大院)、湯浅三郎 (都立科技大)	
	A-11 縦渦を用いた燃焼器ライナの冷却強化 * 小金沢知己、井上 洋、小林成嘉、渡邊泰行 (日立)		B-10 サイクル解析 GUI ソフトウェア開発とマイクロガスタービン概念設計 * 福永茂和 (東大)、上地英之 (東大院)、笠木伸英 (東大)	
	A-12 Ni/Cu 系傾斜機能材料の熱物性値評価 * 藤沢良昭、吉田豊明 (航技研)、高橋雅士、岡村隆成 (東芝)	17:10	B-11 民間ヘリコプタ用ターボシャフトエンジンの計画から開発まで * 内田誠之、安田正治、森下 進、三宅慶明、島内克幸 (三菱重工)	
17:35	A-13 機能性動翼の概念検討 * 小河昭紀、橋本良作、周風華 (航技研)			

*講演会にあわせて都立科学技术大学の小型ターボジェットエンジンの運転、遷・超音速風洞等の見学を予定しています。詳細は当日お知らせいたします。

第28 回ガスタービン定期講演会 (2000 年 6 月 2 日)

参加申込書

(社) 日本ガスタービン学会 行

FAX:03-3365-0387

TEL:03-3365-0095

会社名	
所在地	〒
TEL	
FAX	

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

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

【事務局への連絡事項】

払込方法(○印をつけてください) 参加費入金予定日 月 日

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

当日支払は原則として受け付けません。

(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

*請求書の発行について

- 要 宛名()
- 不要

*領収書の発行について

- 要 宛名()
- 不要

3月号を普通号としてお届けします。通常の普通号と異なるのは、昨秋極めて盛会の内に終了した1999年国際ガスタービン会議神戸大会に関して約20頁を充てたことです。全般、論文、展示等に関して細部に亘って執筆して頂きました。過去最高の参加者数となり、展示を含めガスタービンへの大きな期待と将来を感じさせる国際会議でした。この記事は今回残念ながら参加できなかった方々にも十分その雰囲気や伝わる記事となっていると思います。

随筆では、元川崎重工の谷村篤秀氏に「ガスタービンと歩んだ46年」として長年に亘る開発現場での夢と努力、創意工夫に満ちたガスタービン人生を語って頂きました。

大橋秀雄先生による「オレは技術者だと、誇り高く語れる日を目指して」と共に、特に学生会員や若手・中堅の研究・開発技術者にとって、これからの技術者人生と成長を考え、自己研鑽していくための指針になったのでは、と思われます。

論説・解説の「微細組織制御された構造用セラミックスの開発と評価」は、当初、名古屋工業技術研究所の研究だよりとして企画したのですが、セラミックスの高靱性化というガスタービン技術者にとって極めて興味ある研究内容が含まれていた為、論説・解説に変更したものです。専門外の会員にも理解し易いよう、執筆にご苦労頂きました。極めて個人的な話ですが、嘗てセラミックターボチャージャ及びガスタービンの開発に携わった者

として、今後ガスタービン他への構造用セラミックス材料適用の新しい道が開け、適用拡大されていくことを願って止みません。

講義は連載半ばを過ぎ燃焼工学の第1回目となりました。本連載記事は、学会誌としての新しい試みでしたが大変充実したものになっており、好評を頂いています。また、表紙としては、川崎重工製の鉄道車両用エンジンを取り上げました。

最後に、今月号発行に当たってご多忙中の折りご執筆あるいは資料提供頂きました方々に厚く御礼申し上げます。なお、本号の編集は、植草委員、小川委員、山根委員と佐々木の4名で担当致しました。

(佐々木直人)

〈表紙写真〉

ガスタービン列車

説明：昭和45年7月に国鉄磐越東線で走行試験を行ったガスタービン試験車と、川崎重工業がAvco-Lycoming社と技術提携して製造しているヘリコプタ用T53形ターボシャフトエンジンを一般産業用に構造を改めたKTF1430形2軸式ガスタービンである。

(提供 川崎重工業株式会社)

だより

♣事務局 〆

今年の東京は暖冬でとても過ごしやすく、街を行く人々も長いコートの人はいあまり見受けられず、軽装です。が、そんななかインフルエンザだけは猛威をふるい、事務局でも見事命中して早々とダウンしてしまいました。

早いもので、今年度最後の事務局だよりです。今年度は通常業務のみならず、昨秋の国際会議の事務もあり、忙しい1年で、めまぐるしく過ぎてしまった、という気がします。

4月の通常総会にむけて、年度末の業務がいろいろふえてきますが、その中でも総会での定款変更のため、正会員の3分の2の出席者と委任状を集めなければならず、それが一番の気がかりです。2月末に皆様のお手元にお届けしていますが、委任状を必ず、事務局あてご返送下

さい。また、この学会誌の目次の次のページにも委任状がございしますので、FAXで結構ですから、ご返送お願いいたします。これからは、例年のごとく事業報告、決算のための事務やら評議員会、総会のための資料作り等もろもろの作業に追われる毎日です。今年の東京は昨年の5倍～8倍の花粉の量といわれていますので、花粉症と戦いながらのつらい日々となりそうです。

最後にまたまた、お願いです。4月からの新しい年度が始まる前に未納の会費がある方は、是非お早めにお支払い下さい。また、人事異動の季節です。変更のある方は、FAXでかまいませんので、なるべくお早めに事務局へお届けをお願いいたします。

[A]

3月号を普通号としてお届けします。通常の普通号と異なるのは、昨秋極めて盛会の内に終了した1999年国際ガスタービン会議神戸大会に関して約20頁を充てたことです。全般、論文、展示等に関して細部に亘って執筆して頂きました。過去最高の参加者数となり、展示を含めガスタービンへの大きな期待と将来を感じさせる国際会議でした。この記事は今回残念ながら参加できなかった方々にも十分その雰囲気や伝わる記事となっていると思います。

随筆では、元川崎重工の谷村篤秀氏に「ガスタービンと歩んだ46年」として長年に亘る開発現場での夢と努力、創意工夫に満ちたガスタービン人生を語って頂きました。

大橋秀雄先生による「オレは技術者だと、誇り高く語れる日を目指して」と共に、特に学生会員や若手・中堅の研究・開発技術者にとって、これからの技術者人生と成長を考え、自己研鑽していくための指針になったのでは、と思われます。

論説・解説の「微細組織制御された構造用セラミックスの開発と評価」は、当初、名古屋工業技術研究所の研究だよりとして企画したのですが、セラミックスの高靱性化というガスタービン技術者にとって極めて興味ある研究内容が含まれていた為、論説・解説に変更したものです。専門外の会員にも理解し易いよう、執筆にご苦労頂きました。極めて個人的な話ですが、嘗てセラミックターボチャージャ及びガスタービンの開発に携わった者

として、今後ガスタービン他への構造用セラミックス材料適用の新しい道が開け、適用拡大されていくことを願って止みません。

講義は連載半ばを過ぎ燃焼工学の第1回目となりました。本連載記事は、学会誌としての新しい試みでしたが大変充実したものになっており、好評を頂いています。また、表紙としては、川崎重工製の鉄道車両用エンジンを取り上げました。

最後に、今月号発行に当たってご多忙中の折りご執筆あるいは資料提供頂きました方々に厚く御礼申し上げます。なお、本号の編集は、植草委員、小川委員、山根委員と佐々木の4名で担当致しました。

(佐々木直人)

〈表紙写真〉

ガスタービン列車

説明：昭和45年7月に国鉄磐越東線で走行試験を行ったガスタービン試験車と、川崎重工業がAvco-Lycoming社と技術提携して製造しているヘリコプタ用T53形ターボシャフトエンジンを一般産業用に構造を改めたKTF1430形2軸式ガスタービンである。

(提供 川崎重工業株式会社)

だより

✠事務局 ✉ ✠

今年の東京は暖冬でとても過ごしやすく、街を行く人々も長いコートの人はいあまり見受けられず、軽装です。が、そんななかインフルエンザだけは猛威をふるい、事務局でも見事命中して早々とダウンしてしまいました。

早いもので、今年度最後の事務局だよりです。今年度は通常業務のみならず、昨秋の国際会議の事務もあり、忙しい1年で、めまぐるしく過ぎてしまった、という気がします。

4月の通常総会にむけて、年度末の業務がいろいろふえてきますが、その中でも総会での定款変更のため、正会員の3分の2の出席者と委任状を集めなければならず、それが一番の気がかりです。2月末に皆様のお手元にお届けしていますが、委任状を必ず、事務局あてご返送下

さい。また、この学会誌の目次の次のページにも委任状がごございますので、FAXで結構ですから、ご返送お願いいたします。これからは、例年のごとく事業報告、決算のための事務やら評議員会、総会のための資料作り等もろもろの作業に追われる毎日です。今年の東京は昨年の5倍～8倍の花粉の量といわれていますので、花粉症と戦いながらのつらい日々となりそうです。

最後にまたまた、お願いです。4月からの新しい年度が始まる前に未納の会費がある方は、是非お早めにお支払い下さい。また、人事異動の季節です。変更のある方は、FAXでかまいませんので、なるべくお早めに事務局へお届けをお願いいたします。

[A]

学会誌編集規定

1996.2.8改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。

A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。

C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事(報告、会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報(研究速報、技術速報)、寄書(研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介)、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

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

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。

4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。

5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。

6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。

7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。

8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は、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

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-17-5

Tel. 03-3508-9061 Fax. 03-3580-9217

ニッセイエブプロ(株) 制作部デジタル編集課
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い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。

8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。

9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌

Vol.28 No.2 2000.3

発行日 2000年3月20日

発行所 社団法人日本ガスタービン学会

編集者 益田重明

発行者 菅 進

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13
第3工新ビル 402

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

郵便振替 00170-9-179578

印刷所 ニッセイエブプロ(株)

〒105-0003 東京都港区西新橋 2-5-10

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

©2000, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

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

〒170-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル

学術著作権協会

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

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