



## ガスタービン学会会員に期待する

コンセプツ ETI 社 吉 中 司

### 1. 序

学会誌に随筆を、との仰せに従って、思いむくまま綴ったのが下の文である。非建設的に響く部分があれば、それは私の筆力の至らぬ為で、この拙文の意図とするところではない点、予め御了解頂きたい。

昨年10月19、20日の両日、第2回超音速輸送機用推進システム国際シンポジウムが東京で、又その翌週には本学会主催の1995年国際ガスタービン会議が横浜で、相次いで開かれ、私は久し振りに日本での会議に出席した事も手伝って、新鮮な気持ちで講演を聞いた。その中で、何よりも強い印象を受けたのは、若い技術者、研究者の抬頭だった。次々と最新の研究結果を発表されるベテランに混り、堂々と、質の高い研究発表をする若い講演者たち……。これは、勿論、若手の能力の高さがあってこそその傾向だが、彼等にこれ丈の責任を与え、信頼を託する本学会のベテラン会員諸氏の姿勢があって初めて、出来たことと考える。

こうして、技術の向上だけでなく若手プロフェッショナルの成長にも努力され、いわば表裏両面に亘ってガスタービンに貢献しておられるベテラン会員諸氏への、私の敬服の念は尽きない。しかし、ことガスタービンに関して将来を見る限り、正直なところ、これらベテラン諸氏に、技術革新、研究資金、人的資源について、もっともっと積極的に活動していただく様、願って止まないのである。

### 2. 技術革新

今、米国は、航空技術に関して世界をリードしている状態に甘んじず、国防省を中心として軍用ガスタービン・エンジン技術の飛躍的な革新を目指し IHP TET プログラムに、邁進している。1988年から始まった、3フェーズからなるこのプログラムの終了する西暦2003年には、今日のエン

ジンに比べて推力（又は出力）/重量比で2倍、燃料消費率で30～40%減、の達成が、目標となっている。しかもこれは、生産とオーナーシップ・コストの低下というメリットも含んででいる。それ丈ではない。これらの革新技術が全て民間用エンジンにも使われる事が IHP TET プログラム当初からうたわれている。1996年初頭の今、プログラムは、順調な進展を見せて第2フェーズの終りに近付きつつある。

この事実を踏まえて考えると、今建てられるべきガスタービン技術革新の目標は、それが航空用であろうと地上用であろうと、少なくとも IHP TET プログラムのものと同等、出来ればそれらを上廻るものでなければならぬ。今、日本には上記の超音速輸送機用推進システム研究プロジェクトとセラミック・ガスタービン・プロジェクトがある。これらは、将来の技術革新への良い出発点と思われる。

### 3. 研究資金

高い技術目標を建てた以上、研究に必要な十分な資金の調達が必要だ。そう考えると、超音速輸送機用推進システム研究プロジェクトとセラミック・ガスタービン・プロジェクトを、このまま終らせてはいけない。

また、目標達成と言っても、要素の断熱効率がいくら出たとか、重量が何%減った丈では駄目だ。耐 FOD 性、耐侵蝕性、耐酸化性、耐クリーブ性そして疲労寿命が十分あり、製造や組み立て上のバラツキや実用中のエンジン性能低下を計算に入れた上で、どこまで技術が進んだかが、評価されなければならない。航空用ガスタービン・エンジンを例にとると、その使い法によっては、FAA のブロック・テストを1回合格した程度では、使いものにならない事もある点、注意すべきだ。誇張した言い方をすると、若い技術者や研究者に、エンジンを壊させて技術のブレーク・スルーを生ませる心意気が必要、とならうか。だから、技術目標

(平成8年1月9日原稿受付)

が高くなるにつれて目標達成のためのコストが指数的に高くなる事を忘れてはならない。上記のIHPTETプログラムへの政府及び民間投資の総計を正確に知っている人に会った事はないが、一説には15億ドルを軽く超えると言われている。

#### 4. 人的資源

世界のレベルを凌駕する様な技術を開発するには、質の高い人的資源の確保が必要だ。その方法は幾つか考えられよう。一つは、教育界と協力する事によって、大学での技術系教育に産業界の要求を反映させる事。又一つは、現在例外的でしかない女性の技術専門職への導入を促進する事。他の一つは、必要とあらば外国人技術者の招へいをも否としない姿勢をとる事だ。G7参加国だけでなく、いわゆる開発途上国で生れた人の中にも、非常に優秀な技術系スペシャリストが沢山いる。それに、今や企業競争は、かつての国単位から各経済圏にパートナーを持つ企業グループ単位へと、性格を変えつつある。こうした事を考え合わせると、日本企業内で外国人技術者がバリバリ働らき、又人事管理の位置にある者が、性別とか言語、文化の違う部下を適材適所に使う、という風景は、不自然なものではないどころか、企業にとって好ましいものである。

#### 5. 口頭によるコミュニケーション

ベテラン会員諸氏への願い、という事で筆が随

分滑ってしまった序でに、もう一つ加えておこう。これは若手の口頭によるコミュニケーション能力の開発についてである。上記の2会議での講演でも、非の打ち様の無いものから、明らかに訓練不足のものまで、まちまちであった。若い技術者や研究者は、この程度で許されてはならない。彼等は将来、企業を代表する人達であり、中には世界の技術リーダーになるべき人もいる筈だ。こうした人達が、口頭によるコミュニケーションが不十分な為に、国際的な企業競争の場で、与えられるべき機会が与えられなかったり誤解されたりする様なことがあってはならない。沈黙は金なりとか、実験結果が全てを語る等は、コミュニケーション・テクニックをマスターしていない者(残念ながら、私もこのうちの一人なのだが)の姑息な申し開きでしかない。

#### 6. おわりに

今日本のガスタービン技術は、「世界に認められる」という追い付きモードから「世界に貢献出来る」競合モードに入った。そして近い将来には追われモードにまで達する可能性が十分ある。その時点で、若い会員諸氏が、世界の日本人ガスタービン技術者となれん事を期待している。そうなるかどうかは、やはりベテラン会員諸氏の方向づけで決まると考えられよう。

### 学会誌のA4版化とこれに伴う編集規定等の改訂について

本学会誌は次号(第24巻93号, 1996年6月号)からA4版となります。本会ではガスタービンセミナー資料集, Bulletin of GTSJ, 学術講演会論文集, ガスタービン生産統計資料集と出版物のA4版化を順次すすめてきました。学会誌では4年毎の表紙の色を変える時期に合わせての改訂としたものです。A4版化によって、会誌のページ数は少なくなります。図表等は見やすくなりそうです。編集委員会では新しい誌面をより読み易く、また内容を充実すべく、努力したいと考えております。会員各位からのご意見、ご注文を編集委員会までお寄せ下さい。

学会誌のA4版化に伴い、編集規定および技術論文投稿規定を理事会の承認を得て改訂しました。改訂された規定は本誌奥付ページをご覧ください。また、原稿執筆要領もあわせて改訂しました。依頼原稿の場合には執筆依頼書に新しい執筆要領を添付しますが、投稿などのために執筆要領をご入用の場合には編集委員会事務局までご請求下さい。なお、抜き刷り作成費用は従来通りです。

(編集委員会)

が高くなるにつれて目標達成のためのコストが指数的に高くなる事を忘れてはならない。上記のIHPTETプログラムへの政府及び民間投資の総計を正確に知っている人に会った事はないが、一説には15億ドルを軽く超えると言われている。

#### 4. 人的資源

世界のレベルを凌駕する様な技術を開発するには、質の高い人的資源の確保が必要だ。その方法は幾つか考えられよう。一つは、教育界と協力する事によって、大学での技術系教育に産業界の要求を反映させる事。又一つは、現在例外的でしかない女性の技術専門職への導入を促進する事。他の一つは、必要とあらば外国人技術者の招へいをも否としない姿勢をとる事だ。G7参加国だけでなく、いわゆる開発途上国で生れた人の中にも、非常に優秀な技術系スペシャリストが沢山いる。それに、今や企業競争は、かつての国単位から各経済圏にパートナーを持つ企業グループ単位へと、性格を変えつつある。こうした事を考え合わせると、日本企業内で外国人技術者がバリバリ働らき、又人事管理の位置にある者が、性別とか言語、文化の違う部下を適材適所に使う、という風景は、不自然なものではないどころか、企業にとって好ましいものである。

#### 5. 口頭によるコミュニケーション

ベテラン会員諸氏への願い、という事で筆が随

分滑ってしまった序でに、もう一つ加えておこう。これは若手の口頭によるコミュニケーション能力の開発についてである。上記の2会議での講演でも、非の打ち様の無いものから、明らかに訓練不足のものまで、まちまちであった。若い技術者や研究者は、この程度で許されてはならない。彼等は将来、企業を代表する人達であり、中には世界の技術リーダーになるべき人もいる筈だ。こうした人達が、口頭によるコミュニケーションが不十分な為に、国際的な企業競争の場で、与えられるべき機会が与えられなかったり誤解されたりする様なことがあってはならない。沈黙は金なりとか、実験結果が全てを語る等は、コミュニケーション・テクニックをマスターしていない者(残念ながら、私もこのうちの一人なのだが)の姑息な申し開きでしかない。

#### 6. おわりに

今日本のガスタービン技術は、「世界に認められる」という追い付きモードから「世界に貢献出来る」競合モードに入った。そして近い将来には追われモードにまで達する可能性が十分ある。その時点で、若い会員諸氏が、世界の日本人ガスタービン技術者となれん事を期待している。そうなるかどうかは、やはりベテラン会員諸氏の方向づけで決まると考えられよう。

### 学会誌のA4版化とこれに伴う編集規定等の改訂について

本学会誌は次号(第24巻93号, 1996年6月号)からA4版となります。本会ではガスタービンセミナー資料集, Bulletin of GTSJ, 学術講演会論文集, ガスタービン生産統計資料集と出版物のA4版化を順次すすめてきました。学会誌では4年毎の表紙の色を変える時期に合わせての改訂としたものです。A4版化によって、会誌のページ数は少なくなります。図表等は見やすくなりそうです。編集委員会では新しい誌面をより読み易く、また内容を充実すべく、努力したいと考えております。会員各位からのご意見、ご注文を編集委員会までお寄せ下さい。

学会誌のA4版化に伴い、編集規定および技術論文投稿規定を理事会の承認を得て改訂しました。改訂された規定は本誌奥付ページをご覧ください。また、原稿執筆要領もあわせて改訂しました。依頼原稿の場合には執筆依頼書に新しい執筆要領を添付しますが、投稿などのために執筆要領をご入用の場合には編集委員会事務局までご請求下さい。なお、抜き刷り作成費用は従来通りです。

(編集委員会)

# ガスタービン吸気冷却システム

(株)東芝 齊藤浩平

## 1. はじめに

1970年代から本格化した今日のコンバインドサイクル発電に対する以下のようなアイテムについての評価はほぼ定着し、主として天然ガス焼きである多くのプラントが建設運用され、さらに大型プラントが計画されている。

- \* 熱効率
- \* 起動特性および負荷追従性
- \* NO<sub>x</sub> および CO<sub>2</sub> 排出量
- \* 信頼性
- \* 運転保守
- \* 温排水
- \* 燃料選択

コンバインドサイクル発電に対する技術課題はさらなる高効率化、燃料の多様化等に向け多くの努力が傾注されているが、ガスタービンはその最大出力が大気温度に左右されるという特性はあま

りに根元的でその不便さについて取り上げられる機会は多くない。ガスタービンの最大出力の気温依存性を軽減する手法としてガスタービン吸気冷却システムについて解説、紹介は本誌にもある<sup>(1)</sup>。

ガスタービン吸気冷却システムは夏場の最大電力需要時に出力を増加させるのが第一の使命であり、以下のような冷熱源との組み合わせが実用化されている。

- \* 井戸水、工場プロセス用冷水<sup>(2)</sup>
- \* 水蒸発式冷却器<sup>(3)</sup>
- \* 冷凍機<sup>(4)</sup>
- \* LNG 冷熱<sup>(5)</sup>
- \* 水蓄熱<sup>(6)</sup>

一方、成長する電力需要に対応する発電設備の建設は夏場の午後数時間の電力需要により決定さ

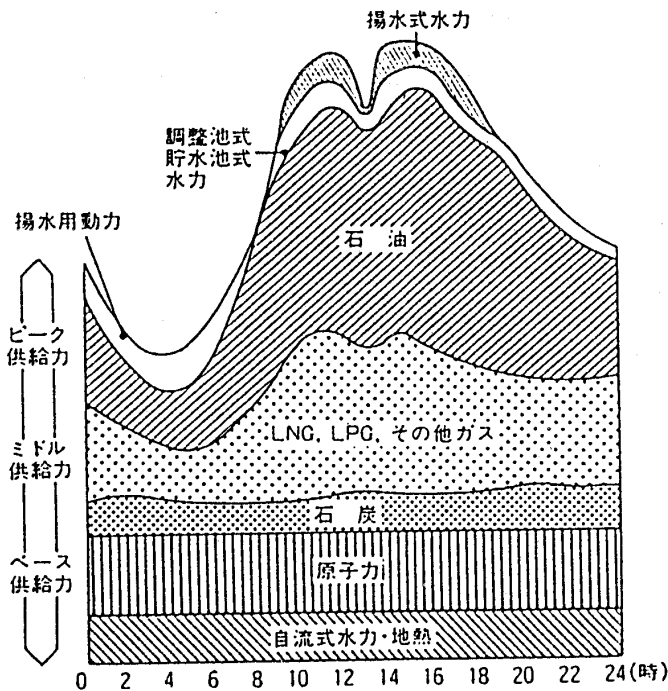


図1 一日の電気使用量の変化

(平成7年12月18日原稿受付)

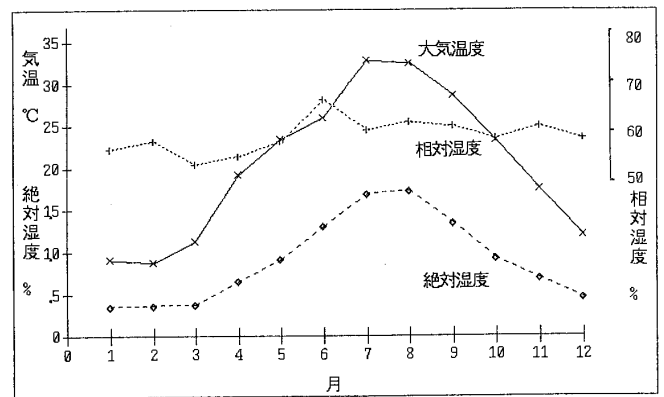


図2 13時における月別平均気温・湿度

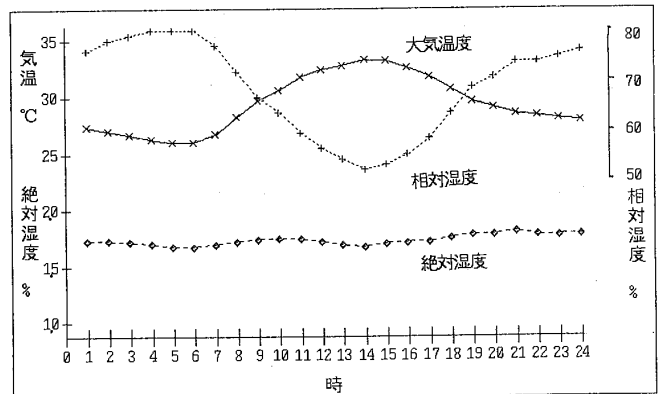


図3 7月における時別平均気温・湿度

れるであろうが、この最大電力需要は図1のように夜間電力量の約2倍に達する負荷パターンである<sup>(7)</sup>。この主因がビルの冷房負荷であることから、負荷平準化、電力利用の効率化を促進するために国及び電力会社による水蓄熱式空調の導入支援・助成制度が行われている<sup>(8)</sup>。

本稿は負荷平準化および高気温時の出力増加を目的とした水蓄熱によるガスタービン吸気冷却システムについて解説する。

## 2. 日本の気象

ガスタービン吸気冷却システムの効果を検討するとき、プラントサイトの気象条件を正しく認識することから始まる。図2はある地点(海浜)における13時の月別平均気温・湿度の変化を示す。図3に7月の時別平均気温・湿度を示す。

日本の気象は高温、多湿であるからガスタービン吸気冷却に向かないとのコメントがある。しかし高湿度といっても30°Cを越える高温時には相対湿度は50%代である。これは特殊な気象時期を除けば空気中の絶対湿度は時間的に急激には変わらないからである。確かにアメリカの砂漠地帯の高温、低湿に比べるとその効果は見劣りするがこの気温、湿度でもガスタービン吸気冷却の効果は期待できる。

## 3. ガスタービン出力の吸気温度特性

気温の上昇にともない空気の比重量  $\text{kg/m}^3$  は減少しガスタービンの吸気のマスフロー  $\text{kg/h}$  が減少するのでガスタービンの出力も右下がり減少する曲線はよく知られている。図4に1300°C級ガスタービン、およびコンバインドサイクルの吸気温度-出力特性を示し、その出力低下の内訳を概説する。ガスタービンの運転はタービン入口温度一定の制御をかけ、ベース定格(入口案内翼全開)とし、吸気温度15°Cの値を基準にして比率で現わす。

- A: ガスタービン吸気のマスフロー
- B: 吸気温度の上昇にともない圧縮機吐出温度が上昇し燃焼器での温度上昇が減少する分
- C: ガスタービン(ブレイトン)サイクルの効率減少分
- D: ガスタービンの出力
- E: 蒸気タービンの出力
- F: コンバインドサイクルの出力

例えば15°Cから40°Cの温度上昇に対し空気量が約9%減少し(A)、圧縮機吐出温度が上昇するので燃焼器温度上昇が約3%減少する(B)。(従って燃料は12%減少する。)この吸気マスフローの減少によりタービン入口圧力が減少しサイクルの効率が約6%減少する(C)。これらを合計し、ガ

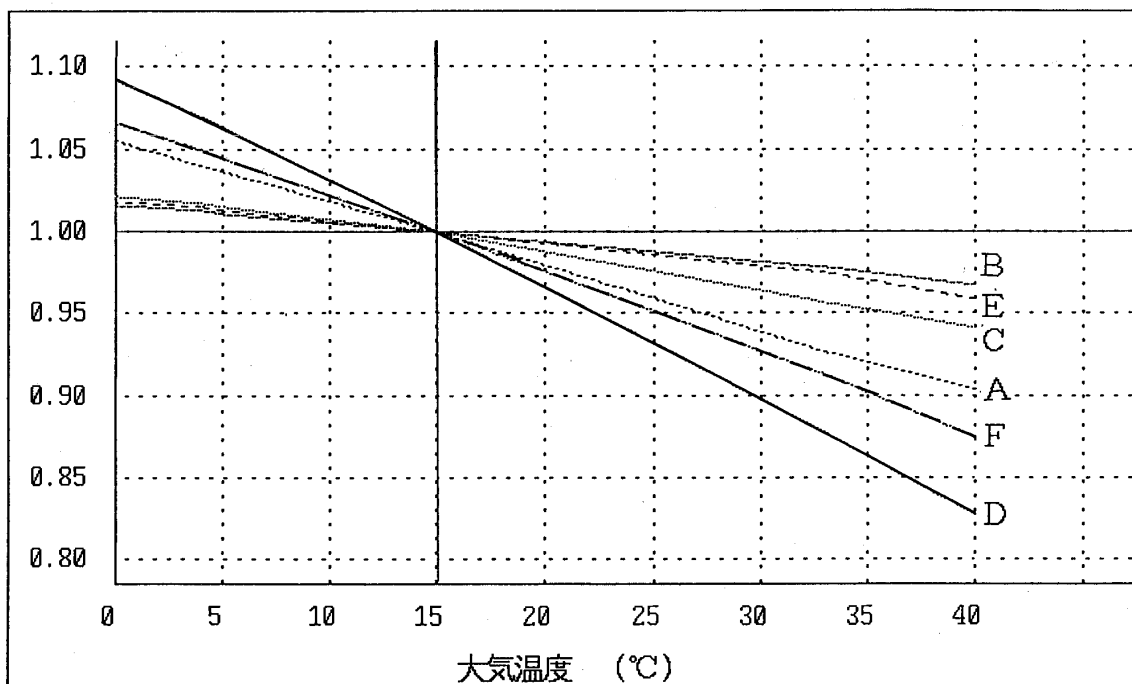


図4 ガスタービン吸気温度-出力特性

スタービン出力は合計17%減少する(D)。

一方、吸気温度の上昇にともないガスタービンの排気温度は上昇するのでボトムサイクル(蒸気サイクル)の効率も上昇し、ガスタービン排気量は9%減少するのに蒸気タービンの出力は4%の減少に留まる(E)。ガスタービン60%、蒸気タービン40%の概略出力比の加重平均によりコンバインドサイクル出力としては約12%の減少となる。(F)

ガスタービン吸気冷却による出力増加はコンバインドサイクルよりシンプルサイクルプラントにおいてより大きな効果が現れると言える。そのほかにガスタービンの吸気条件の変化が性能に影響を及ぼすものとして絶対湿度、吸気圧損があるが量的には大きなものではない。

4. 湿り空気線図

一般の大気は比熱0.24 kcal/kgの乾燥空気と比熱0.44 kcal/kgの水蒸気の混合物、湿り空気であり冷却時にはこの水蒸気分の存在がガスタービン吸気冷却器の交換熱量の大きささらにシステムの容量決定に影響を及ぼす。図5は湿り空気線図

上にガスタービン吸気冷却器前後の状態変化の例を示す。

- a: ガスタービン吸気冷却器前 (33°C・相対湿度60%とする。)
- b: 空気中の水蒸気の顕熱範囲の冷却にとどめ、冷却器表面での結露水の発生を最小にする場合
- c: さらに冷却を進めガスタービン出力増加を行う場合。(米国では5°C以下にまで冷却している例もある。)
- d: 蒸発式冷却器(温度効率50%)の場合。

5. 氷蓄熱によるガスタービン吸気冷却システム

氷蓄熱によるガスタービン吸気冷却システムの一例を図6に示す。1300°C級ガスタービンは吸気流量1 kg/s 当たり約0.3 m<sup>2</sup>の吸気フィルタが設置されるので、これを収納する吸気室を利用して表面冷却式冷却器を設置する。

夜間製氷時に運転される冷凍機、冷凍機からポンプアップされる熱を排出する冷却塔、製水器そして氷水を蓄える貯水槽などから構成される。補

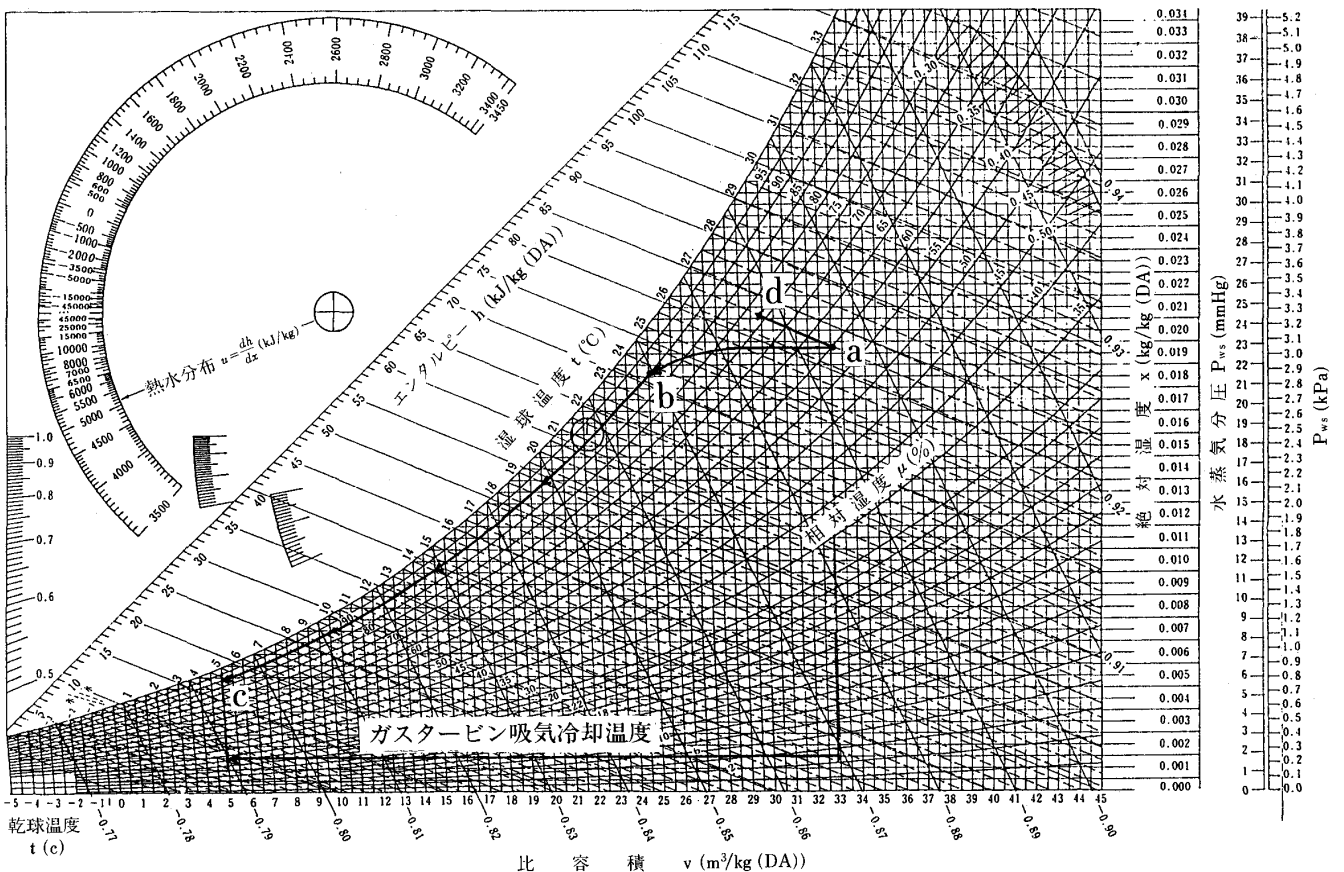


図5 湿り空気線図

機類としてはガスタービン吸気冷却運転をするとき冷水を貯水槽から取り出し吸気冷却器へ送水する冷水ポンプ、および製氷時に運転される循環ポンプ等がある。

### 5.1 製氷装置

製氷法を大別すると Static 形と Dynamic 形に分類される。前者は静止した水を冷却して氷を作るもので、堅い氷が出来る。一定の容積中にたくさんの水を蓄えることは出来るが、冷熱を取り出す（解氷する）のに時間がかかるのでビル空調に向く。アイスオンコイル法が一般的である。後者は流動している水の中で製氷するもので、シャーベット状の柔らかな水となり短時間に大量の冷熱を取り出すことが出来るのでガスタービン吸気冷却に向く。流動過冷却法、不凍液直接接触法、水溶液結氷法等が開発されている。

これらの他に Static 形と Dynamic 形の間隔的なハーベスト法や特殊なカプセル中の水にラインで冷熱の授受を行うものもある。

### 5.2 冷凍機

大型ガスタービンの吸気冷却システムの冷凍機は数百 Rt(冷凍トン: 通常は US 冷凍トンで、 $0^{\circ}\text{C}$  の水、2000 ポンド=907 kg を 24 時間に  $0^{\circ}\text{C}$  の水にする能力、3024 kcal/h) 以上の大型となるのでターボ冷凍機（遠心式）の適用範囲である。冷媒

はオゾン破壊能 0 (対 CFC 11) の冷媒 HFC-134 a が使われる。

この冷凍機の放熱を約  $30^{\circ}\text{C}$  の（冷却塔）冷却水で行う場合、水蓄熱で  $5-7^{\circ}\text{C}$  の冷水を得るのならば圧縮機圧力比は 3 程度の成績係数の良い単段のターボ冷凍機が使えるが、マイナス数度以下の低温冷熱源を必要とする水蓄熱の場合は圧力比が 5 以上必要となるので二段圧縮式ターボ冷凍機が必要である。圧縮、凝縮後の減圧、膨張も 2 段（中間にエコマイザー）にして冷凍機の成績係数 (COP) を改善する。現状 2.5 程度の COP が商品化されている。

### 5.3 吸気冷却器

吸気冷却熱交換器の設計では圧力損失とチューブ表面に生成する凝縮水の処理および騒音対策等が重要である。 $0^{\circ}\text{C}$  に近い冷水がチューブの中を通るのでチューブ表面には空気中の水蒸気の凝縮が避けられず吸い込み空気の流れに乗って多量の水滴がガスタービンに流入する。ガスタービン吸気フィルターに影響を及ぼすことはないようにミストエリミネーターを設置してキャリオーバーを 1% 以下におさえる。交換器にはプレートフィンチューブ、セレーテッドフィンチューブ、ソリッドフィンチューブ等がつかわれているがガスタービン吸気冷却用熱交換器には同一の冷却能にたい

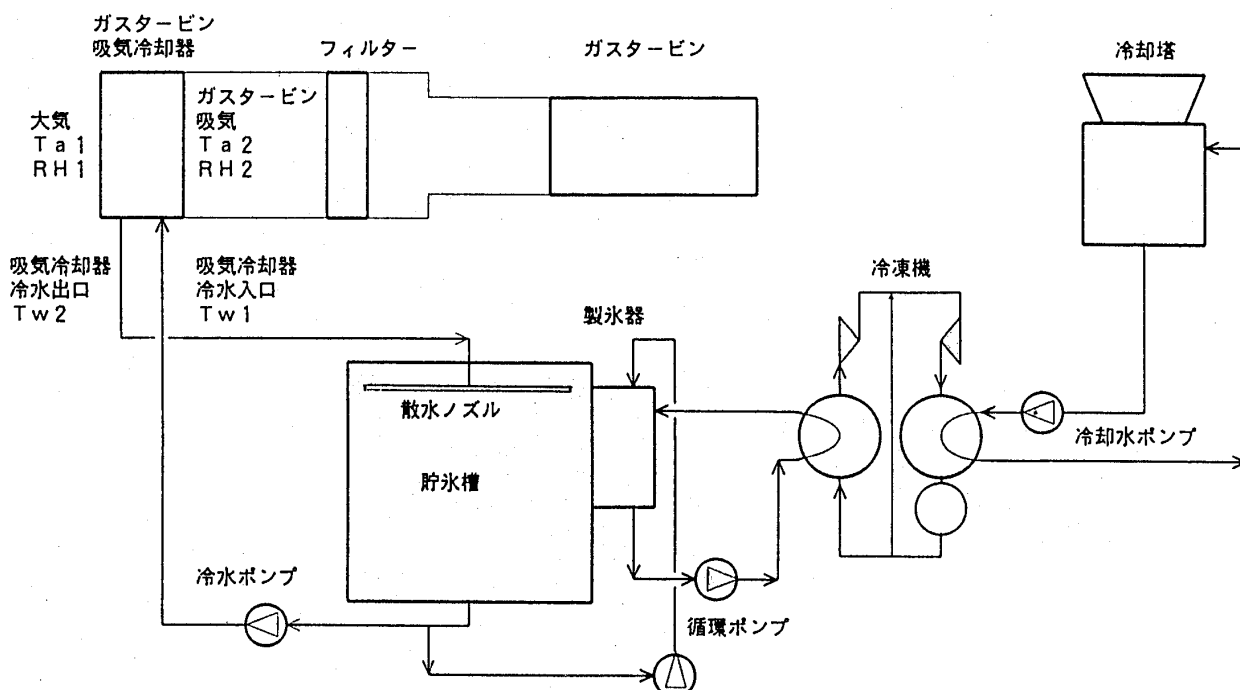


図 6 ガスタービン吸気冷却システム線図

し圧力損失が少ないソリッドフィンが適している。フィン材質は耐候性の良いアルミニウムである。

### 6. 氷蓄熱システムの容量計算

設備価格を決めるシステムの容量は以下の設計条件により計算される。

- \* 大気温度，相対湿度設計点をどこにおくか。
- \* それを何度まで冷却する冷却器を設計するか。
- \* 貯水槽取り出し冷水温度および戻り温度
- \* 冷却器設計条件にて一日何時間の冷却運転を行うか。
- \* 一日何時間の製氷運転を行うか。

#### 6.1 吸気冷却器の大きさ

吸気冷却器の大きさは交換熱量と冷水入口（貯水槽取り出し温度）・出口温度（貯水槽へ解氷のために戻る温度）により決まる。戻り温度は貯水槽の設計に影響し冷却器の大きさとトレードオフの関係にある。

図7はガスタービン吸気冷却器入口空気（33°C・相対湿度60%とする。）を横軸の温度まで冷却する設計をしたときの冷却器の交換熱量，冷却器伝熱面積，冷却運転によるコンバインドサイクル出力増加の様子を示す。冷却器出口空気温度（ガスタービン吸気温度）が26°C程度の浅冷却設計までは空気中の水蒸気の顕熱範囲の冷却であるからあまり多くの結露水は生成しないが，さらに

深冷却設計とすると次第に水分の凝縮に冷熱をとられ交換熱量が大きくなり冷却器を始めシステムの容量も指数関数的に大きくなる。

#### 6.2 貯水槽の大きさ

一定の冷熱を蓄熱するのに必要な槽の大きさは次式で与えられる。

$$V = D / (R \times (ipf \times 80 + Tw2))$$

$$D = q \times a \times m$$

ここに，

- D : 蓄熱量 kcal
- q : 吸気冷却器交換熱量 kcal/hr
- a : 1日の冷却運転時間 hr
- m : 吸気冷却運転中の冷熱損失率
- R : 冷熱取り出し率
- ipf : 氷充填率（重量ベース）
- Tw2: 貯水槽戻り冷水温度°C

Rとipfの間にはある相関関係がある。冷却器からの戻り水 Tw2 にて解氷し，Tw1の冷水を冷却器に送る時，Tw1は一般に図8のような変化を示す。送水初期は0°C近くの水がすぐに温度上昇を始め4°C付近で安定し，ある時間が過ぎると更に急速に温度上昇を始める。これは槽内の氷と水の混合物中を温水が解氷しながら温度を下げ冷水取り出し口に向かうとき，ある特定の水路（みず

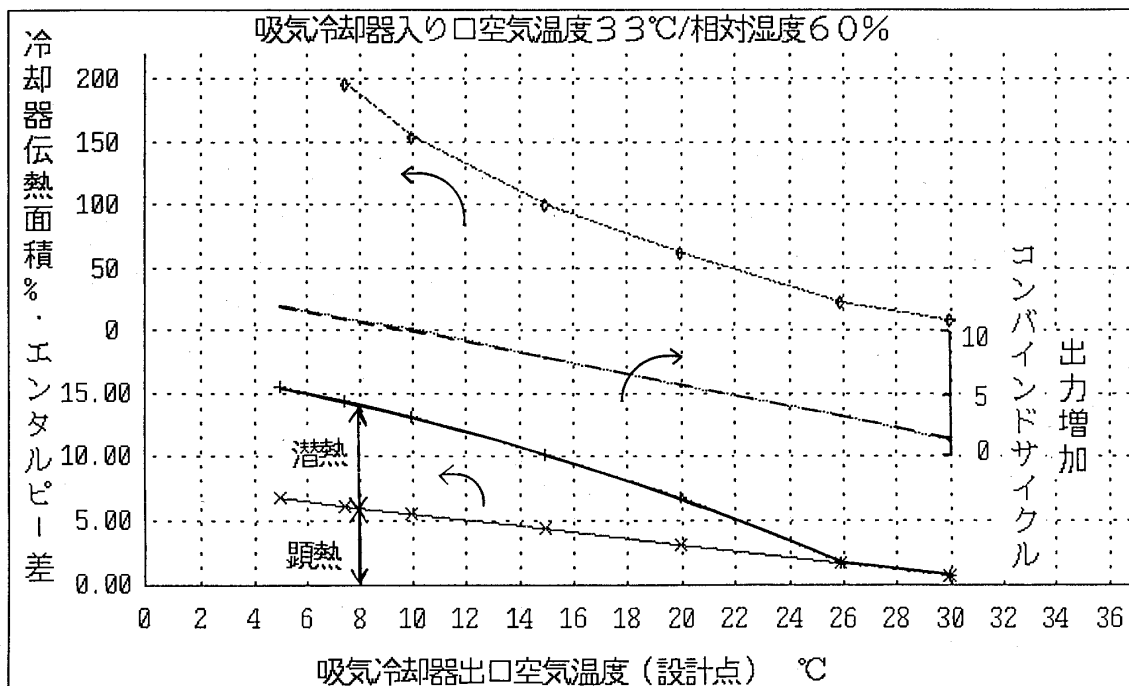


図7 吸気冷却器設計条件



みち) が形成されるとそれ以降は解氷が進まず取り出し温度が急上昇する現象である。

便宜上冷水取り出し温度 6°C を吸気冷却運転の限界とすると、冷却運転開始からこの時点までが 1 日の冷却運転時間 a 時間であり、取り出された冷熱量が  $q \times a$  kcal である。この時槽内の冷熱はすべて取り出された訳ではなく戻り温度  $T_w2$  に対しまだ十分低い温度の冷水、氷が残される。冷却運転終了時までに取り出された冷熱と、運転開始時点で槽に蓄えられていた冷熱との比を冷熱取り出し率 R と定義する。これはガスタービン吸気冷却のように短時間に多量の冷熱を取り出す(高速解氷) 場合の現象で、一定の貯水槽からゆっくり冷熱を取り出す場合には完全成層が成立し戻りと取り出しがピストン流となるので 100% 近い冷熱取り出し率が可能となる。

図 9 に弊社の大型貯水槽(写真 1) で実験した一定の冷熱取り出し速度下での ipf と R の関係を示す。この関係を使って蓄熱量一定の貯水槽の大きさを計算すると槽の大きさが最少になる ipf が存在することが分かる。ただしこの関係は蓄えられた氷の性状、冷熱取り出し速度と貯水槽の大きさとの比、および槽の構造等により異なる。

### 6.3 冷凍機の容量

冷凍機の容量  $USR_t$  は次式で与えられる。

$$RT = q \times (a/b) \times n / 3024$$

電動機出力 kW は次式で与えられる。

$$kW = q \times (a/b) \times n / 860 / COP$$

ここに、

q : 冷却器交換熱量 kcal/hr

- a : 1 日の冷却運転時間 hr
- b : 1 日の製氷運転時間 hr
- n : 製氷運転中および待機時間中の冷熱損失

COP : 冷凍機成績係数

一日の冷却運転時間と製氷時間の比 (a/b) が設備容量を決める重要なパラメータである。

### 7. 吸気冷却運転による増分出力のエネルギー効率

昼間の吸気冷却運転時の発電効率は概略通常運転時のコンバインドサイクル効率に等しい。しかし前夜に製氷運転時に消費した電力を考慮すると吸気冷却運転による増分出力のエネルギー効率はどのくらいになるかを問われる。

昼間発電した増分 MWh と、夜間製氷に消費される MWh とを同じ価値とみなすことは本シス

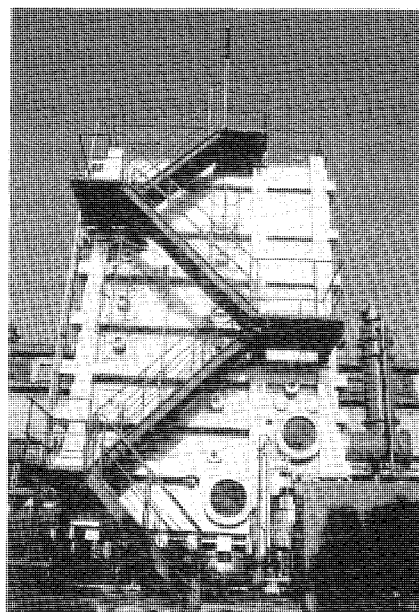


写真 1 製氷・蓄熱試験装置

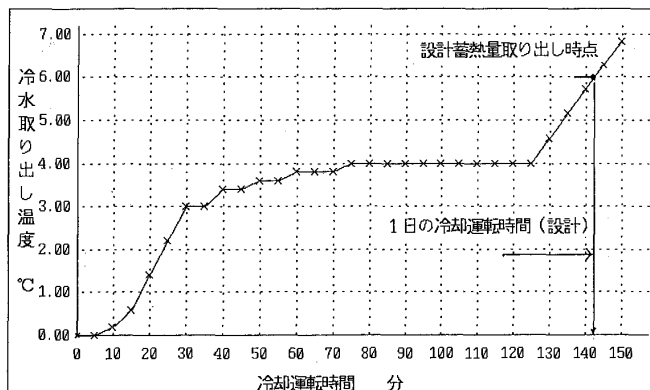


図 8 蓄水槽取り出し冷水温度の変化

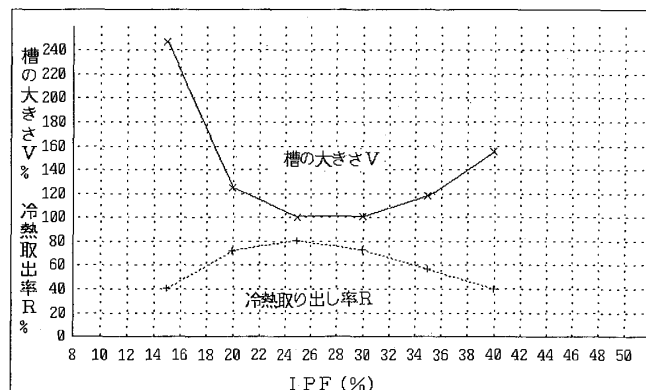


図 9 冷熱取り出し率と ipf の関係

テムの主旨とは相いれないものがあるが、あえてエネルギー効率を以下の様に定義して計算する。

$$\text{効率} = (\text{増分発電量} - \text{製氷電力}) / (\text{増分燃料})$$

増分発電量は吸気冷却運転による出力増加×冷却運転時間であり、製氷電力量は冷凍機動力及び冷却塔、水ポンプ動力合計×製氷時間である。この2量の倍率は夜間製氷に消費した電力の何倍の電力を昼間のガスタービン冷却運転で増分発電するかを表わす。図10は吸気冷却器出口空気温度を設計点で何度まで冷却するかによりこの倍率が変わり、上式より計算される増分発電分のエネルギー効率が変わる様子を示す。たとえば入口温度33°C・相対湿度60%の空気を約20°Cまで冷却する設計をすると増分発電量は製氷電力の2倍になり、その増分の効率は約25%となる。

### 8. ガスタービン吸気冷却システム特性曲線

これまでの章はシステムの設計点での説明であったが、ある決まった容量のシステムにおいて設計点以外の気象条件下での運転特性を求め年間の発電量増分、ガスタービン燃料増分、所要動力等を計算する必要がある。図11, 12, 13に大気条件とコンバインドサイクル出力を、冷却運転有り無しについて例示する。通常のコバインドサイクル運転では湿度の影響は少ないので破線1本で大気温度と出力の関係を現わしている。ある大気温度、相対湿度の時吸気冷却運転をしたときのコンバインドサイクル出力は実線で現わされているので、吸気冷却による出力増大 MW は縦軸実線と破線との間である。3図とも冷却器入口設計温度は33°C、相対湿度60%とする。図11は冷却器で25°Cまで冷却する設計、図12は冷却器で

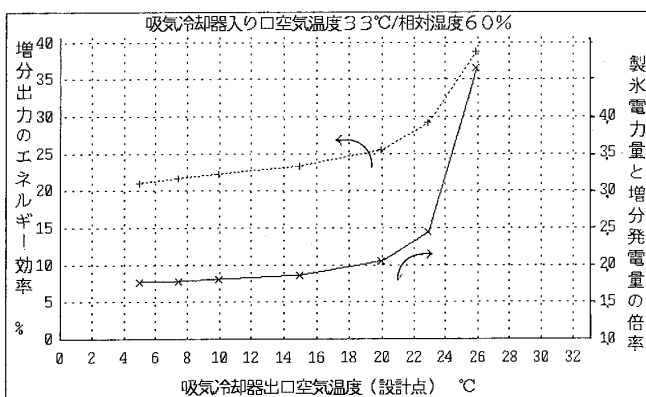


図10 増分出力のエネルギー効率

15°Cまで冷却する設計、図13は冷却器で5°Cまで冷却する設計の場合の出力特性である。

### 9. ガスタービン吸気冷却システムの制御

夜間の電力を利用し製氷満蓄した冷熱を昼間のピーク負荷時にシステム的能力いっぱいの冷却運転を行い1kWでも増出力運転を行い冷熱を使いきるのが基本的運用と考える。この場合は冷却運

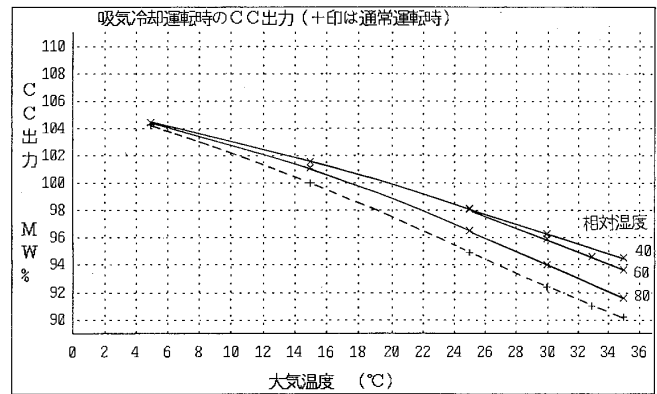


図11 吸気冷却システム出力特性 (冷却器出口温度 25°C 設計)

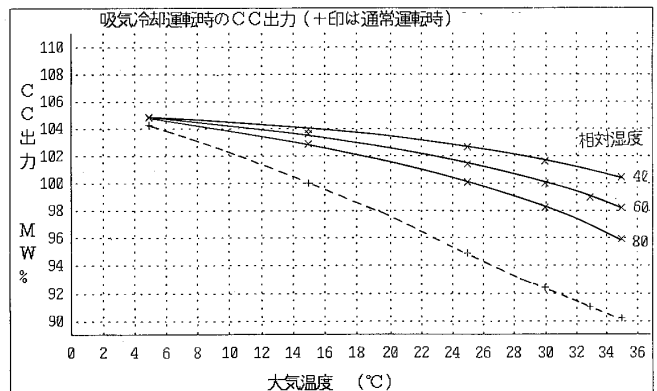


図12 吸気冷却システム出力特性 (冷却器出口温度 15°C 設計)

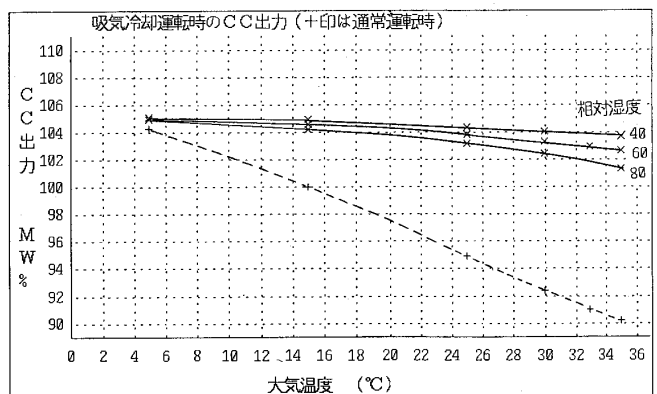


図13 吸気冷却システム出力特性 (冷却器出口温度 5°C 設計)

転の on-off, 製氷運転の on-off 以外特別な制御はいらない。しかしこのシステムを具備したコンバインドサイクルユニットをより高度な利用をするために以下のような制御も可能である。

### 9.1 軸出力一定運転

気象条件の変化に対して, また6章で紹介した蓄熱槽よりの冷水温度の変化に対して軸出力一定の運転を行うために冷水流量を調整, またはガスタービン吸気の一部を冷却器バイパスさせガスタービン入口温度を変化させることにより任意の設定出力をガスタービンベース運転する。

### 9.2 冷熱有効利用運転

高湿度時に能力いっぱいの送水を行うと水分の凝縮に冷熱を取られる。冷却器出口空気に絶対湿度計を設け計測値と入り口絶対湿度との差をある一定値になるよう冷水流量を制御することによりガスタービン吸気の冷却を水分の顕熱範囲より大幅にはずれないようにして冷熱の有効利用を図る。

なおガスタービンの燃焼から生成される NO<sub>x</sub> は HRSG 内の脱硝装置で処理されるが, この制御のアルゴリズムにガスタービン吸気の絶対湿度が使われている。この信号のために軸毎に湿度センサーを持つ必要がある。

## 10. 氷蓄熱によるガスタービン吸気冷却システム実施例の紹介

おわりにに代えて米国ネブラスカ州リンカーン市で 1991 年完成の実施例を紹介する<sup>(5)</sup>。

ガスタービン GE MS 7000 B 53 MW

吸気冷却器入口設計温度/湿度	38.3/34%
吸気冷却器出口設計温度	4.4°C
1 週間の冷却運転時間	20 hr (4 hr/日 × 週 5 日)
1 週間の製氷運転時間	148 hr (20 hr/日 × 週 5 日および 24 hr/週末 2 日)
貯水槽容量	4343 m <sup>3</sup>
充填率	90%
冷凍機容量	608 USRt
吸気冷却による出力増加	10.5 MW
冷却器冷水流量	37.85 m <sup>3</sup> /min
冷水温度上昇	6.7°C
空気側圧力損失	12.7 mmHg
制御気温	38.3°C まで冷却器出口 空気温度を 4.4°C 一定

### 参考文献

- (1) 馬路他 日本ガスタービン学会誌 VOL. 15 NO. 60 MAR. 1988 p. 73
- (2) 平林, 表 日本ガスタービン学会誌 VOL. 15 NO. 60 MAR. 1988 p. 35
- (3) 女鹿 平成四年度第 18 回省エネルギー推進 全国大会東北地区大会事例集 p. 44
- (4) Marc de Piolenc GAS TURBINE WORLD May -June 1993 p. 56
- (5) 電気新聞 1995 年 11 月 1 日
- (6) Marc de Piolenc GAS TURBINE WORLD Jan. -Feb. 1992 p. 20
- (7) 東京電力 エネルギーを考える シリーズ 4
- (8) 小熊 省エネルギー Vol. 47 No. 8 JULY 1995, p. 68

## 会費納入・自動振替のお願い

今年度会費(正会員 5000 円 学生会員 2500 円)を未納の方は, 至急事務局宛お送り下さい。又, 以前よりお願い致しております「会費の自動振替制度」につき再度お願い申し上げます。未だ手続きをされていない方は, 過日お送りしました振込依頼書又は会誌巻末のとじ込み用紙にご記入の上, 事務局宛お送り下さい。

転の on-off, 製氷運転の on-off 以外特別な制御はいらない。しかしこのシステムを具備したコンバインドサイクルユニットをより高度な利用をするために以下のような制御も可能である。

### 9.1 軸出力一定運転

気象条件の変化に対して, また6章で紹介した蓄熱槽よりの冷水温度の変化に対して軸出力一定の運転を行うために冷水流量を調整, またはガスタービン吸気の一部を冷却器バイパスさせガスタービン入口温度を変化させることにより任意の設定出力をガスタービンベース運転する。

### 9.2 冷熱有効利用運転

高湿度時に能力いっぱいの送水を行うと水分の凝縮に冷熱を取られる。冷却器出口空気に絶対湿度計を設け計測値と入り口絶対湿度との差をある一定値になるよう冷水流量を制御することによりガスタービン吸気の冷却を水分の顕熱範囲より大幅にはずれないようにして冷熱の有効利用を図る。

なおガスタービンの燃焼から生成される NO<sub>x</sub> は HRSG 内の脱硝装置で処理されるが, この制御のアルゴリズムにガスタービン吸気の絶対湿度が使われている。この信号のために軸毎に湿度センサーを持つ必要がある。

## 10. 氷蓄熱によるガスタービン吸気冷却システム実施例の紹介

おわりにに代えて米国ネブラスカ州リンカーン市で1991年完成の実施例を紹介する<sup>(5)</sup>。

ガスタービン GE MS 7000 B 53 MW

吸気冷却器入口設計温度/湿度	38.3/34%
吸気冷却器出口設計温度	4.4°C
1週間の冷却運転時間	20 hr (4 hr/日×週5日)
1週間の製氷運転時間	148 hr (20 hr/日×週5日および24 hr/週末2日)
貯水槽容量	4343 m <sup>3</sup>
充填率	90%
冷凍機容量	608 USRt
吸気冷却による出力増加	10.5 MW
冷却器冷水流量	37.85 m <sup>3</sup> /min
冷水温度上昇	6.7°C
空気側圧力損失	12.7 mmHg
制御気温	38.3°C まで冷却器出口空気温度を4.4°C一定

### 参考文献

- (1) 馬路他 日本ガスタービン学会誌 VOL. 15 NO. 60 MAR. 1988 p. 73
- (2) 平林, 表 日本ガスタービン学会誌 VOL. 15 NO. 60 MAR. 1988 p. 35
- (3) 女鹿 平成四年度第18回省エネルギー推進 全国大会東北地区大会事例集 p. 44
- (4) Marc de Piolenc GAS TURBINE WORLD May-June 1993 p. 56
- (5) 電気新聞 1995年11月1日
- (6) Marc de Piolenc GAS TURBINE WORLD Jan.-Feb. 1992 p. 20
- (7) 東京電力 エネルギーを考える シリーズ4
- (8) 小熊 省エネルギー-Vol. 47 No. 8 JULY 1995, p. 68

## 会費納入・自動振替のお願い

今年度会費(正会員5000円 学生会員2500円)を未納の方は, 至急事務局宛お送り下さい。又, 以前よりお願い致しております「会費の自動振替制度」につき再度お願い申し上げます。未だ手続きをされていない方は, 過日お送りしました振込依頼書又は会誌巻末のとじ込み用紙にご記入の上, 事務局宛お送り下さい。

中部電力(株)	田 中	雅
〃	石 川	明
三菱重工業(株)	岸 本	健 治
〃	尾 崎	明 雄
〃	渥 美	正 博

1. はじめに

近年の急激な電力需要の増加に対応するべく、各電力会社では新規発電プラントの増設を含め、発電出力の向上に努めている。特に夏場の昼間に電力需要がピークを迎えるため、このときの電力供給量を確保することが最も重要な課題の1つとなっており、この電力需要に対して発電出力を大きく変えられるガスタービン発電プラントやコンバインド発電プラントが有効な手段となっている。しかしながら、ガスタービンは大気温度が高くなると空気密度が減少して出力や効率が低下する特性を持っているため、夏場のピーク時には発電出力が相反して最も低下する。この一例を図1に示す。この図では、入口温度5°C、相対湿度60%の吸気条件で定格出力158 MWに調整されているガスタービンが、大気温度が30°Cまで上昇すると出力が131 MWまで下がり約17%も出力低下することがわかる。

この点を改善するために、氷蓄熱方式やLNG冷熱利用方式などのガスタービン吸気冷却システムが検討あるいは一部で実用試験段階に入っている。氷蓄熱式吸気冷却システムは、夜間電力で氷を製造貯蔵しておき、これを冷熱源として昼間にガスタービン吸気部に配置した熱交換器で吸気冷却させるもので、アメリカで一部実用化されつつある。LNG方式はLNGを冷熱源として吸気冷却を行なう方式で、LNG基地に隣接したプラントに適用され、氷蓄熱式と異なり冷熱源発生に動力を必要としないなどの利点がある。

これらの方式に対して、まったく新しい吸気冷却システムとして図2に示す液体空気噴霧式ガス

タービン吸気冷却システムを現在研究開発している。このシステムは、夜間電力により液体空気を製造・貯蔵しておき、昼間のピーク時にガスタービン吸気部に直接噴霧して吸気冷却を行なうシステムで、吸気冷却のための大型熱交換器を必要としない上、噴霧流量のコントロールによりその時々に応じたフレキシブルな吸気冷却が可能であるなどの他のシステムにない特徴を有している。

ここでは、この液体空気噴霧式吸気冷却システムについて小型ガスタービンによる吸気冷却試験

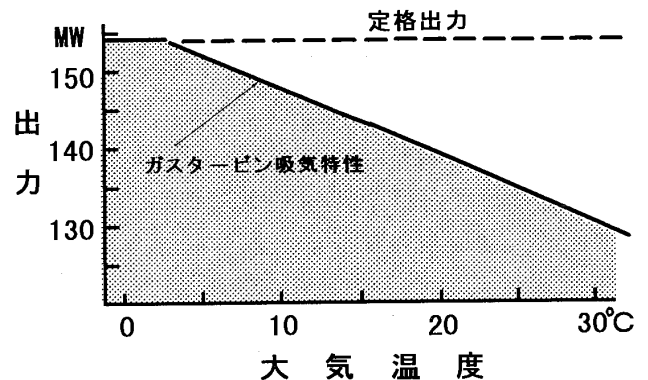


図1 吸気温度特性

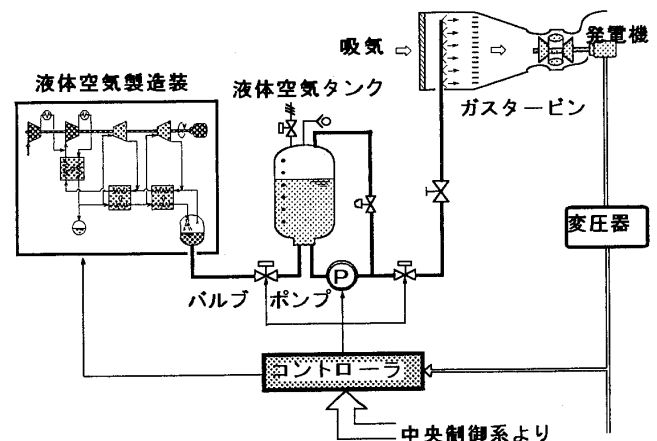


図2 液体空気噴霧式吸気冷却システム

(平成7年12月22日原稿受付)

などの結果も交えながら紹介する。

## 2. システム概要

### 2.1 液体空気による吸気冷却の特徴

液体空気の特徴を、氷や LNG などのその他の冷熱源と比較しながら表 1 に示す。大気圧、飽和状態における液体空気は温度  $-194^{\circ}\text{C}$ 、密度  $870\text{ kg/m}^3$  の極低温流体であり、標準状態（大気圧、 $0^{\circ}\text{C}$ ）までのエンタルピ差が約  $400\text{ kJ/kg}$  ある。これを単位体積当りのエンタルピ差に換算すると  $356\text{ MJ/m}^3$  となり、氷蓄熱で使用される（50% 氷 + 50% 水）冷熱源の 2 倍以上の冷熱エネルギー密度を有している。このため、冷却能力は高く、例えばコンプレッサ吸気の質量流量の 3% の液体空気を噴霧するだけで温度  $30^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60% の空気を  $20^{\circ}\text{C}$  まで冷却することができる。

この液体空気の特性を利用すると、以下に示す特徴を持った吸気冷却システムをつくることができる。

- ① 単位体積当りの冷熱量が大きいいため貯蔵効率が高く、タンク容量が小さい。
- ② 直接噴霧のため、熱交換効率が高い。
- ③ 大型熱交換器が不要で、吸気圧力損失が無い。
- ④ 冷熱源発生動作係数は低く、氷蓄熱に比べ約 6 倍の動力が必要となる。
- ⑤ 噴霧流量の調整によりその時々状況に応じてフレキシブルな吸気冷却ができる。

さらに、後述するように、本システムには吸気冷却の際に発生する過飽和の水分が  $10\text{ }\mu\text{m}$  以下の霧状態となってガスタービン本体に流入し、ハードウェアに損傷を与えることなく発電出力向上をはかることができるという特徴がある。これは吸気冷却部に大型熱交換器を使用するシステムでは過飽和水分を除去する必要があるのに比べて、冷熱エネルギーの有効利用の面から見て大きな利点となる。そのため液体空気を製造する動力が大きくても、エネルギーの転換上それほど大きな短所とはならない。

以上の特徴から液体空気噴霧式吸気冷却装置で夏場のピーク発電や緊急発電を行なう場合、小規模な設備で発電出力を大きく増加でき、最終的に建設単価の安い経済的に有利なシステムを構成することができる。

表 1 吸気冷却冷熱源の比較

冷熱源	氷	液体空気	LNG
蓄熱の種類	融解熱	気化熱	気化熱
吸気冷却方式	間接熱交換	直接噴霧	間接熱交換
吸気圧力損失	100mmAq	0mmAq	100mmAq
冷熱源温度	$0^{\circ}\text{C}$	$-194^{\circ}\text{C}$	$-120^{\circ}\text{C}$
冷熱エネルギー			
密度	917kg/m <sup>3</sup>	870kg/m <sup>3</sup>	386kg/m <sup>3</sup>
エンタルピ	338kJ/kg	414kJ/kg	810kJ/kg
単位体積当りのエンタルピ	165kJ/m <sup>3</sup>	356kJ/m <sup>3</sup>	313kJ/m <sup>3</sup>
	(氷 50%: 水 50%)		
作動係数*	1.8	0.28	-
設備規模	比較的広い土地が必要	現有設備内	LNG 基地隣接

\* 作動係数：発生冷熱量/必要動力

### 2.2 システム構成

液体空気噴霧式吸気冷却装置は、図 2 に示されたように、大きく分けて液体空気製造装置、貯蔵タンクおよび噴霧装置の 3 つから構成される。このシステムでは、まず電力需要の低い夜間や休日に液体空気製造装置で空気を液化し、タンクに貯蔵する。電力需要が増加する夏期昼間のピーク時に、この液体空気を噴霧ポンプによって昇圧し、噴霧ノズル群を通して吸気部に均一に直接噴霧する。この際、噴霧流量は噴霧圧力でのみ決定されるため、噴霧ポンプの回転数制御により吸気温度を容易に制御できる。この際、液体噴霧パターンは噴霧ノズルの特性により圧力に依存せず均一に保たれる。

また、本システムで使用される液体空気製造装置は、液体空気中の水分やドライアイスなどの不純物含有率に対する純度要求が低く、かつ、基本的に DSS (Daily Start Stop) 運転が要求されるため、一般の空気分離装置などに装着されている水分や二酸化炭素用の大型吸着装置は必要なく、大幅にコストダウンされた装置となっている。

### 3. 液体空気噴霧による吸気冷却の特性

#### 3.1 吸気冷却温度特性

液体空気をガスタービン吸気部に直接噴霧すると、蒸発潜熱により周りの大気から熱が奪われるため吸気温度が低下する。冷却後の空気が飽和温度以下に冷却されると過飽和状態となり水蒸気の一部が凝縮して微細なミストとなる。この状態は次式により算出される。

エネルギーバランス

$$m_0 H_0 + m_{la} H_{la} = (m_0 + m_{la}) H_1$$

$$H_i = C p_{air} (T_i - 273) + x_i \{ \Delta H_{boil} + C p_w (T_i - 273) \}$$

相状態変化

$$x_i = \begin{cases} 0.622 \frac{\varphi_i P_s}{P - \varphi_i P_s} \\ x_{sat} \end{cases}$$

$$x_{sat} = 0.622 \frac{P_s(T_i)}{P - P_s(T_i)}$$

ここで変数、添字は以下を示す。

変数 $m$	: 流量 [kg/s]
$H$	: エンタルピ [J/kg]
$\Delta H_{boil}$	: 水の気化熱 [J/kg]
$Cp$	: 比熱 [J/kg, K]
$T$	: 温度 [°C]
$x$	: 絶対湿度
$\varphi$	: 相対湿度
$P_s$	: 水の飽和蒸気圧力 [HPa]
$P$	: 大気圧 [HPa]
添字 $i$	0 : 大気
	1 : コンプレッサ入口
	$la$ : 液体空気
	$air$ : 乾燥空気
	$w$ : 水蒸気

一例として、大気温度 30°C、相対湿度 70% の空気に対する液体空気噴霧冷却特性を算出し、これを図3に示す。23.7°C の飽和状態に達するまでは噴霧された全部の液体空気が吸気温度低下に作用するが、過飽和状態に入ると液体空気の一部がミストの凝縮熱として使われるため噴霧流量に対する吸気温度の低下の割合はゆるやかになる。この際に発生するミストは、霧の発生と同じで空気中の水分が凝縮して発生するため、数  $\mu\text{m}$  程度の極

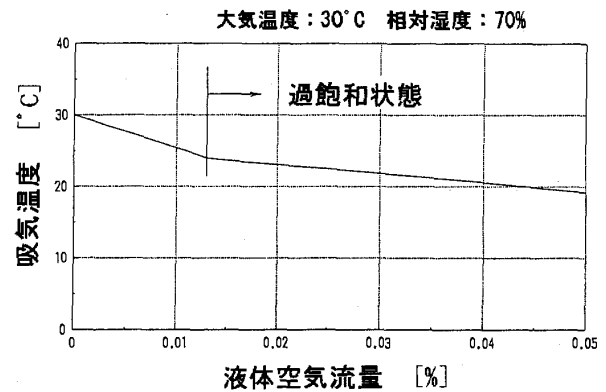


図3 液体空気噴霧冷却特性

めて細かな水滴となる。

#### 3.2 過飽和ミストとガスタービン出力

吸気温度低下によるガスタービン出力の向上は基本的に次の因子による。

- ① 吸気温度低下に伴う空気密度の増加
- ② コンプレッサ動力の低下 (エンタルピ差の減少)

液体空気噴霧により吸気冷却を行なう場合、ガスタービン出力の増加は、飽和状態に至るまではガスタービンの吸気温度特性に沿って変化するが、過飽和状態になると発生する微細ミストがコンプレッサ内に流入するため見かけ上吸気温度におけるガスタービン出力より大きな値となる。これはミストにより空気質量流量 (空気密度) が増加するとともに、コンプレッサ低圧段でミストが蒸発するためコンプレッサ出口温度が低下しコンプレッサ動力が減少することによる。勿論、これは発生するミストがハードウェア損傷への影響が問題とはならない数  $\mu\text{m}$  程度の粒径であって初めて可能となる。氷蓄熱式吸気冷却装置のように大型熱交換機を用いる場合には、伝熱特性上冷却面で水分が凝縮し、ガスタービンに損傷を与える程度の大きな水滴に成長するため、この水分を除去しなければならない。この点がシステム構成的にも、エネルギー的にも他システムと大きく異なる本システム最大の特徴となる。

#### 4. 小型ガスタービン吸気冷却試験

液体空気噴霧式吸気冷却システムの吸気冷却特性やガスタービン出力増加特性を実証するために小型ガスタービンを用いて噴霧式吸気冷却試験を実施した。ここでは、冷熱源として容易に入手可能で、液体空気と物性特性がほとんど変わらない

液体窒素を用いた。

4.1 試験装置

試験装置を図4および写真1に示す。試験装置は小型ガスタービン、水動力計、吸気プレナム、噴霧ノズル、エンジンテストベットおよび液体窒素供給装置から構成されている。

ガスタービンエンジンには特性、入手性、扱い易さから Allison 501 KB5 を選定した。このエンジンの吸気温度-出力特性を図5に示す。試験中、ガスタービンは負荷に合わせて14200 rpm 一定回転を保つように燃料流量制御が行われている。

液体窒素供給装置は、図6に示すように、約2 m<sup>3</sup> のランタンク、注排液バルブ、ベントバルブ、液体窒素供給バルブ、タンク圧力制御バルブおよびタンク加圧用のヘリウムガスボンベから構成される。液体窒素の供給は、タンク加圧制御バルブにより所定のタンク圧力に設定されたランタンクから液体窒素供給バルブを開閉することにより行われる。この際、液体窒素流量は、ランタンクの圧力制御により 0.14~0.53 kg/s の範囲で自由に

変えることができる。

液体窒素噴霧は吸気プレナム上部に取り付けられた噴霧ノズルを通して行われる。このノズルは液体窒素用に設計・製作された一種のスワールノズルで、写真2に示すように液体窒素は噴霧圧力、流量によらず常に90°の噴角を保ちながら広角に噴霧される。液体窒素はこのノズルで微細化されて広角に噴霧されると0.1秒以下の極めて短い時間で蒸発するため、コンプレッサ入口では既に冷

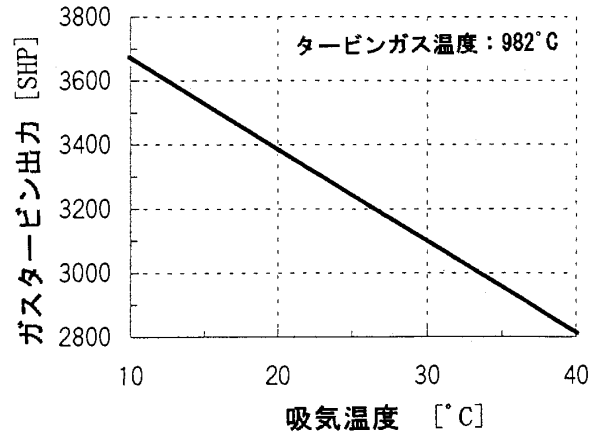


図5 吸気温度-出力特性

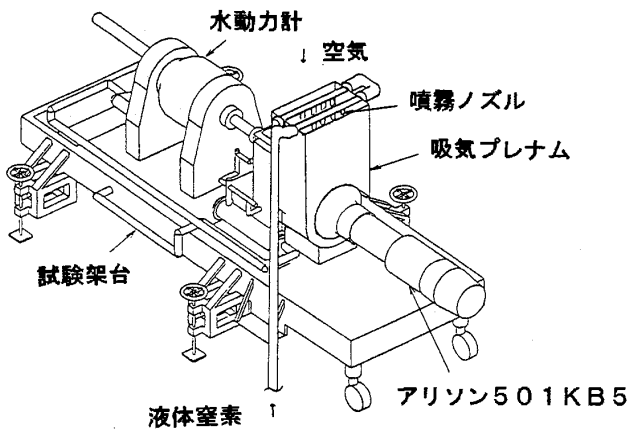


図4 小型ガスタービン吸気冷却試験装置

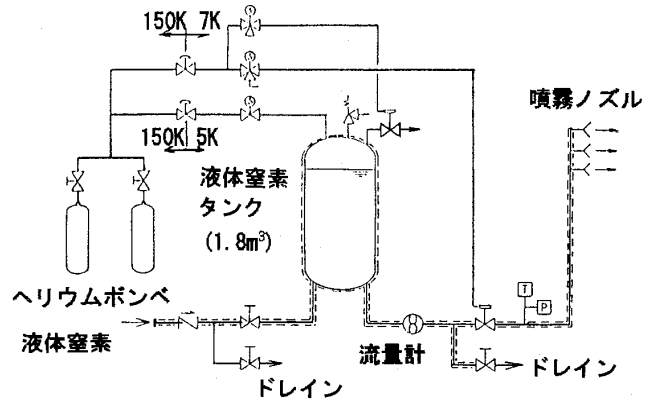


図6 液体窒素供給装置

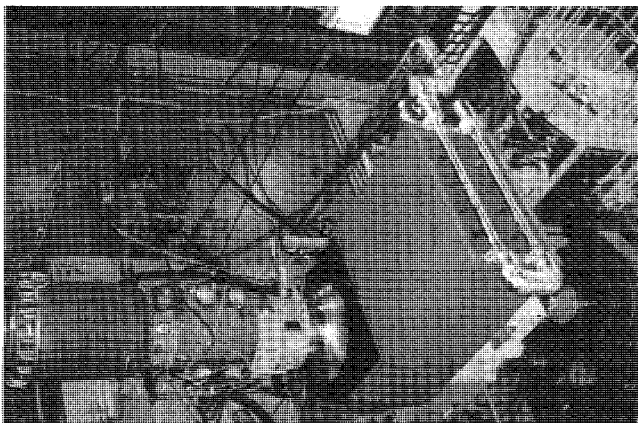


写真1 試験装置全体

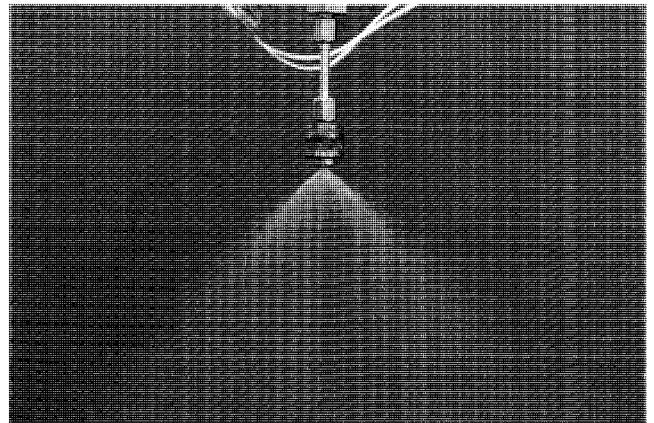


写真2 噴霧ノズル



却は完了している。

4.2 試験結果

試験結果の概要を表2に示す。試験は噴霧流量を一定にして定常データを取得し、試験ケース毎に噴霧流量を変えて、飽和冷却試験1回(AC001)と過飽和冷却試験2回(AC002,003)の計3回を実施した。各試験では、負荷をコントロールしてタービン入口温度が982°Cになるように設定し、吸気冷却噴霧前後でのガスタービン出力の変化を計測する方法で行なった。ただし、試験ケースAC002では設備上の都合からタービン入口温度

表2 液体窒素噴霧式吸気冷却試験結果概要

試験番号	吸気条件	試験結果
AC001	大気条件 19.3°C, 55.6% LN <sub>2</sub> 流量 0.167kg/s	タービン入口温度 982°C 吸気冷却 19.3→14.9°C ガスタービン出力 3415→3521SHP (3%UP)
AC002	大気条件 24.5°C, 78.2% LN <sub>2</sub> 流量 0.357kg/s	タービン入口温度 900°C 吸気冷却 24.5→17.4°C ガスタービン出力 2471→2723SHP (7%UP)
AC003	大気条件 31.1°C, 61.6% LN <sub>2</sub> 流量 0.528kg/s	タービン入口温度 982°C 吸気冷却 31.1→20.3°C ガスタービン出力 3052→3439SHP (11%UP)

を900°Cで実施し、これを換算して評価を行なった。

この結果、試験ケースAC003では液体窒素流量0.53kg/s(吸気流量の3%)を流すことで吸気温度を31.1→20.3°Cまで下げてガスタービン出力を11%向上させることができた。

これらの試験データから、温度30°C、相対湿度70%を標準条件として噴霧流量-出力特性を整理し、図7に示す。また、吸気温度-出力特性を図8に示す。図7からわかるように過飽和状態に入ると噴霧流量に対して吸気温度の低下の割合は緩やかになっているもののガスタービン出力増加はほぼ推定曲線にそって上昇している。これは、前述したように吸気温度が下がった効果に加えて、

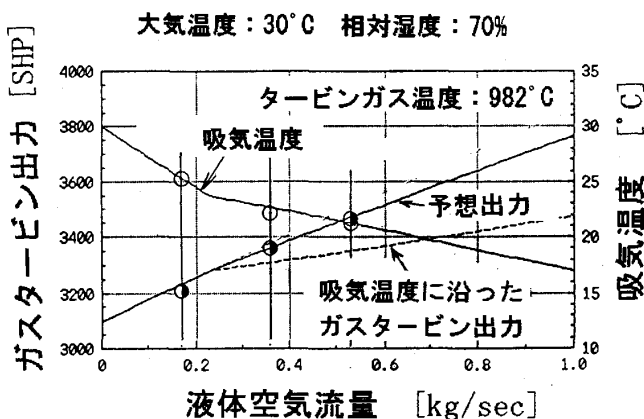


図7 噴霧流量-出力特性結果

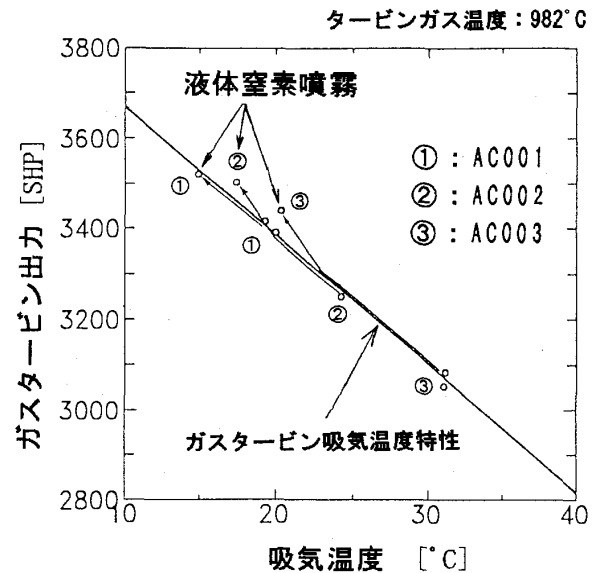


図8 吸気温度-出力特性結果

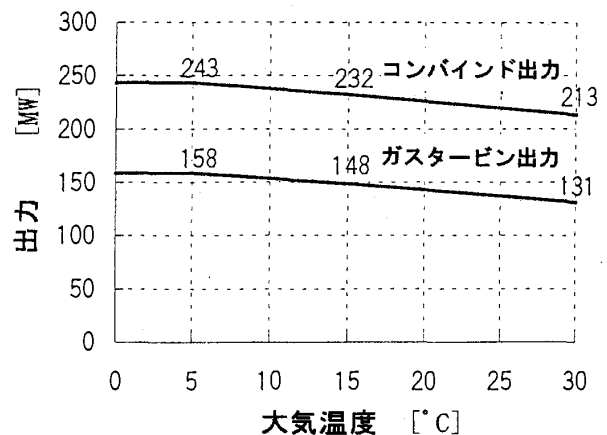


図9 川越発電所コンバインドプラント 吸気温度-出力特性

過飽和状態で発生した水分もガスタービン出力に有効に作用していることによる。図8では、この特性が明確に出ていて、過飽和冷却を行なったAC 002, 003の試験では、見かけ上ガスタービンの持っているコンプレッサ入口温度-出力特性に比べて出力が向上していることがわかる。

この出力増加特性は大型のガスタービンでも基本的に変わず、噴霧された液体空気はすべて有効に出力増加に作用させることができる。

5. 実機コンバインドプラントへの適用検討

液体空気噴霧式吸気冷却システムを実際のコンバインドプラントに夏期ピーク発電システムとして適用した場合について検討を行なう。検討にあたって以下の条件を設定した。

- ① ガスタービンコンバインドプラントは図9に示された吸気温度特性を持つ。
- ② 対象プラントのガスタービン軸数は全部で7軸とする。
- ③ 夏期ピーク時の平均大気条件は気温 30°C, 相対湿度 70% 一定とする。
- ④ 吸気冷却は全軸の発電出力を定格出力まで増加させるように行なう。
- ⑤ 吸気冷却時間はピーク時の5時間を対象とし、液体空気製造時間は最大12時間とする。

この検討結果を表3に示す。表3からわかるように、液体空気流量 202 kg/s (吸気流量の6.8%) を噴霧することで、発電所全体で約1軸分に相当する224 MWの出力向上をはかることができる。

吸気冷却装置としては、図10に示すように、ガスタービン7軸の各軸に150 m<sup>3</sup>の貯蔵タンクを5基ずつ配置する。液体空気は製造流量 22.5 kg/sの液体空気製造装置4基で全貯蔵タンクに供給される。単位出力あたりの設備費を示す建設単価はほぼ事業用発電所の約1/3と見込まれており、夏期ピーク発電として要求される大出力を安い設備費で実現することが可能となる。

6. まとめ

液体空気を利用した吸気冷却装置によるガスタービン発電の出力向上をはかるシステムについて概念検討を行なうとともに、小型ガスタービン吸気冷却試験を実施し、システムの成立性について実証を行った。

表3 液体空気噴霧式吸気冷却装置

性能	
発電出力	
通常出力	1 4 9 1 MW
吸気冷却時出力	1 7 1 5 MW
増加出力	2 2 4 MW
出力増加率	1 5 %
吸気条件	
大気条件	
温度	3 0 ° C
相対湿度	7 0 %
吸気条件	
温度	1 6 . 5 ° C
相対湿度	1 0 0 % (水分 0 . 6 %)
発電プラント	
ガスタービン	
種類	5 0 1 F
基数	7
吸気冷却装置	
方式	液体空気直接噴霧
吸気噴霧	
噴霧流量	2 8 . 9 k g / s * 7 基 (噴霧/吸気 = 6 . 8 %)
作動時間	5 時間 / 日
貯蔵タンク	
基数	5 基 * 7 軸
液体空気製造装置	
製造流量	2 2 . 5 k g / s * 4 基
台数	1 2 時間 / 日

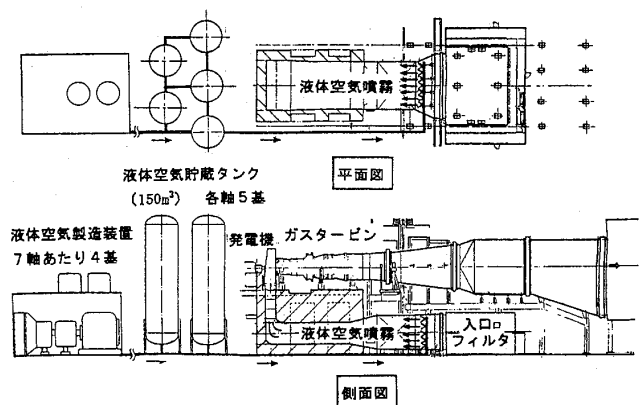


図10 吸気冷却装置概要構成

この結果、液体空気噴霧流量のコントロールにより、定格出力までの大きな出力増加がフレキシブルに発生できる夏期ピーク発電に有効なシステムとなり得る事がわかった。

東京大学生産技術研究所 小林 敏雄

## 1. 乱流モデル

本講義の(1)および(2)において乱流解析の実例と課題について述べてきた。諸工業の実際の流れ場はその形状自体が複雑である場合が多い。したがって、乱流解析をそのような流れ場に適用する場合には、まず、格子生成を如何に短時間に効率よく行うかが求められる。しかしながら、流れ場の解明のためには最終的には利用した乱流モデルの善し悪しが議論の対象となる筈である。乱流モデルについて詳しくは文献(1)を参照いただくとして、ここでは  $k-\varepsilon$  モデルとラージ・エディ・シミュレーション (LES) に焦点をあてて記述する。

層流、乱流にかかわらず、非圧縮性の流体现象は、連続の式と Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

で記述される。ここに、 $u_i$  は瞬時の速度ベクトルの 3 方向成分、 $p$  は圧力、 $\rho$  は流体の密度、 $\nu$  は動粘度である。この方程式を数値的に直接解く方法は存在し (直接シミュレーション (DNS) という)、既にチャンネル内乱流や 2 次元バックステップ乱流の解析が試みられているが<sup>(2,3)</sup>、単純な流路形状をもつ、しかも比較的レイノルズ数の低い乱流に限られている。乱流は、流れ場の幅程度の大規模な渦から、散逸を支配するような小規模な渦までさまざまなスケールの渦を含んでいる。乱流の直接シミュレーションはこれらすべての渦を表現しなくてはならない。この条件を満たすためには解析の空間分解数は 1 方向に

$$\frac{\text{乱れの最大長さスケール}}{\text{乱れの最小長さスケール}}$$

程度が必要であると考えられる。乱れの最小長さスケールをコルモゴロフ長さスケールとすると、この比はレイノルズ数の  $3/4$  乗と見積もられることから、3 次元の計算では  $Re^{9/4}$  程度の格子数が必要となる (ただし、ほとんどの散逸はコルモゴロフスケールの 10 倍程度の長さスケールが担っている)。いずれにしても現実的な問題においては乱流現象を十分な解像度で直接に解くことは現在のコンピュータ能力では不可能に近く、また、近い将来においても可能となるものではないであろう。

したがって、現実の乱流現象を解析する手段としては何らかのモデルを導入して計算負荷を緩和することになる。多くの場合、工業上必要とされる流れ場の情報は時間平均値のような統計量である。この場合、微細な変動を含んだ流れの全性状を知る必要はなく、ある程度平均化された流れ場を解くことができれば十分である。すなわち、エネルギーの供給に密接に関係する大きなスケールの渦に着目し、それより小さな変動 (乱れ) をモデル化するという取り扱いが利用されることになる。乱流中の大きなスケールの運動成分を抽出する手段として、時間平均、空間平均、アンサンブル平均がある。乱流現象は平均値自体が時間および空間的に変動するので、時間平均あるいは空間平均は、その平均操作における時間幅、あるいは空間幅の選択に不確定な要素が残り、概念的にはアンサンブル平均が分かりやすい。しかしながら、流れの各点での多数の観測値から平均を求めるといったアンサンブル平均は現実的でなく、何らかの時間平均操作あるいは空間平均操作で代替することも多い。

## 2. 標準型 $k-\varepsilon$ モデルの構成

さて、流れの基礎方程式である式(1)、(2)において、速度および圧力を

$$u_i = \bar{u}_i + u_i', \quad p = \bar{p} + p' \quad (3)$$

と分解して、アンサンブル平均あるいは時間平均

(平成 8 年 1 月 18 日原稿受付)

操作を施すとよく知られたレイノルズ方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} \quad (5)$$

が得られる。式(5)の右辺の  $-\rho \overline{u_i u_j}$  がレイノルズ応力である。この二重相関の存在によって式(4), (5)は平均量に関して閉じていない。すなわち、平均流れ場を式(4), (5)によって解くためには  $-\rho \overline{u_i u_j}$  を既知量で表す必要がある。この方法として大別しては、渦粘性モデルを用いる方法と  $-\overline{u_i u_j}$  の輸送方程式を解き、より高次の相関をモデリングする方法とがある。後者は応力方程式モデルと呼ばれる解析手法につながるがここでは詳しくは言及しない<sup>(4)</sup>。前者の考え方は以下の通りである。分子拡散による運動量輸送において、分子粘性応力  $\tau_{ij}$  は実験的に

$$\tau_{ij} = \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

のように勾配拡散の形式で表されることが認められている。ここに  $\nu$  は分子動粘度で、

$$\nu = \left( \frac{1}{3} \right) \bar{v} \cdot l_t \quad (7)$$

と表される。ここに  $\bar{v}$  は分子平均速度、 $l_t$  は平均自由行程である。式(5)の  $-\overline{u_i u_j}$  は乱れによる運動量輸送を意味しているので、この応力が  $\tau_{ij}$  と同じ形式で表現できると仮定すると

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\nu_t = \nu_t \cdot \ell \quad (9)$$

$\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタ、 $\nu_t$ 、 $\ell$  はそれぞれ、乱流渦の特徴的速度と長さスケールである。 $\nu_t$  は渦粘性係数と呼ばれる。式(8)が高い精度で成り立つためには変動場の高い等方性と平均場と変動場の高い分離性が必要である。

さて、乱流の平均場は式(4), (5), (8)を連立させて解くことになる。ここで未知数  $\nu_t$  は乱流の代表速度  $k^{1/2}$  ( $k$  は乱流エネルギー) と粘性消散率  $\epsilon$  (代表長さスケールの代替未知数) を用いて

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (10)$$

と表される。式(10)における  $k$  と  $\epsilon$  は Navier-Stokes 方程式から導いたそれぞれの厳密な輸送方程式の幾つかの項をモデル化して得られる輸送方程式を解くことによって求められる。標準型  $k-\epsilon$  モデルの基礎方程式を表1に示す。

### 3. $k-\epsilon$ モデルの弱点と改良

この標準型  $k-\epsilon$  モデルは多くの流れに適用されチャンネル流れなどの比較的単純な乱流場においては多大の貢献をなしている。工業上の乱流解析にも適用例が多く、本講義(1)において例示したように設計段階にも利用されつゝある<sup>(5)</sup>。しかしながら課題ももっている。上述のようにこのモデルは式(8)で示される勾配拡散近似と  $k$ ,  $\epsilon$  輸送方程式のモデル化という近似を含んでいる。工業分野での乱流現象では衝突、旋回、曲がり、せん断、圧力勾配等によって特に前者の近似の基盤となる  $-\overline{u_i u_j}$  の等方性が保証されない恐れが強い。以下にその幾つかの例を示しておく。

標準型  $k-\epsilon$  モデルは講義(1)の図6で示したように、旋回乱流の解析に弱点をもつ。図1は円管内旋回乱流の  $k-\epsilon$  モデルによる解析例である。ある断面における実験値を入力条件として計算を進行させて、下流側の断面の速度分布を計算し、同じ実験結果と比較したものである。円周方

表1 標準型  $k-\epsilon$  モデルの基礎方程式と数値定数

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$\frac{Dk}{Dt} = D_k + P_k - \epsilon$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = D_\epsilon + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon)$$

$$P_k = \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2$$

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$

$$D_\epsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right)$$

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44,$$

$$C_{\epsilon 2} = 1.92$$

向成分の不一致が目立つ。乱れの異方性を加える  
とこの不一致は解消されることが確かめられてい  
る<sup>(6)</sup>。図2は一様流中に置かれた2次元正方形柱  
まわりの流れをk-εモデルで解析した例であ  
る。標準型k-εモデルでは柱体の前方で乱流エ

ネルギーk が大きな値をもつ。これは理論的考察  
あるいは実験事実と相容れないことである。これ

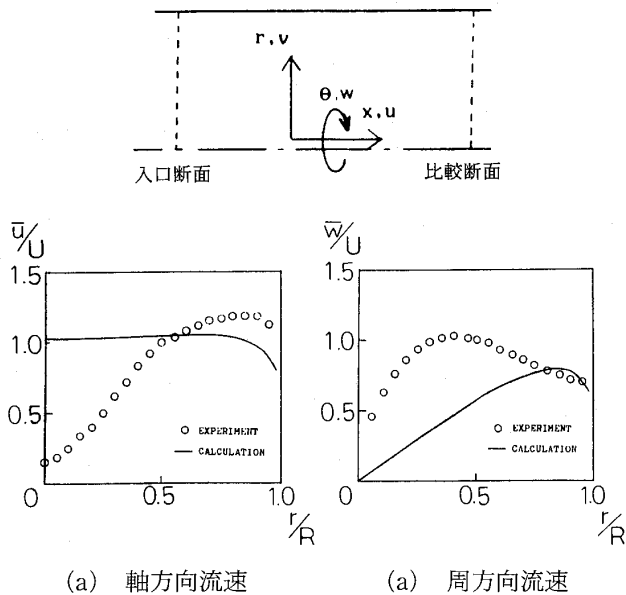


図1 円管内旋回流のk-εモデルによる解析例

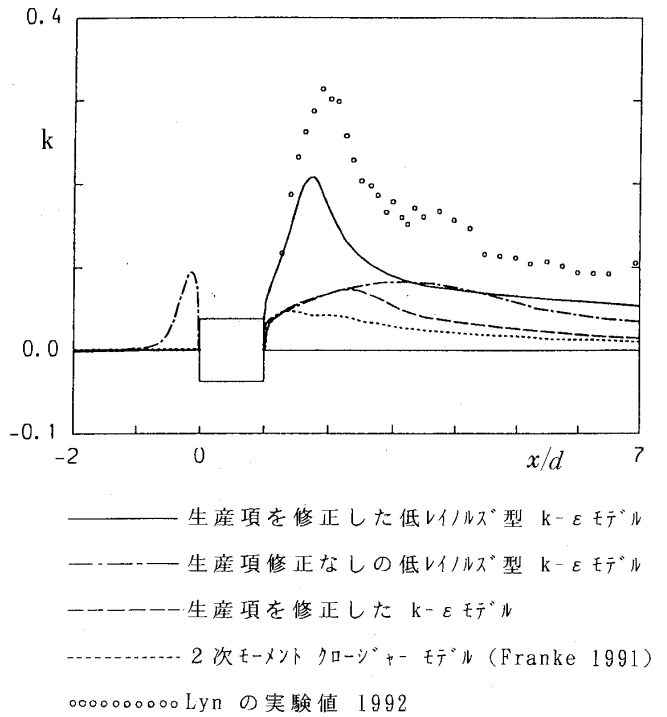


図2 正方形柱前方の衝突領域における  
kの過大評価

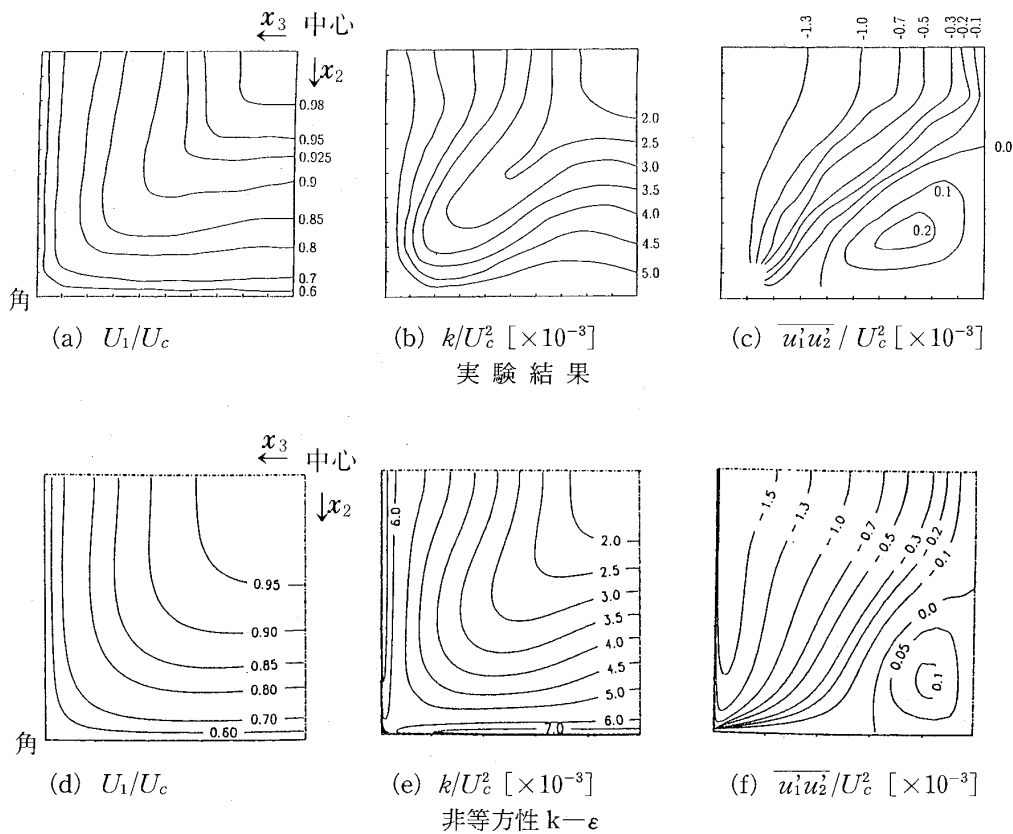


図3 矩形ダクト内乱流の非等方k-εモデル

を緩和させるモデルが、アドホックではあるが提案されている<sup>(7)</sup>。

矩形断面をもつ真直管内の乱流には第2種2次流れと呼ばれる断面内流れが存在する。標準型  $k-\epsilon$  モデルでは原理的にこれを表現することはできない。図3に矩形断面の四半部分における管軸方向速度  $U_x$ 、乱流エネルギー  $k$  およびせん断応力  $\overline{u_1 u_2}$  の分布の非等方  $k-\epsilon$  モデルによる計算結果と実験結果を示す。 $U_0$  は軸方向速度の最大値である。乱れの非等方性を考慮した  $k-\epsilon$  モデルは、図に示すようにこの2次流れを記述することが可能である<sup>(8)</sup>。

剥離流れに対する標準型  $k-\epsilon$  モデルの性能はどうであろうか。前述の講義(1)の表1に示したように標準型  $k-\epsilon$  モデルは再付着位置を正しく評価することはできていない。この原因の一つとしてバックステップ乱流における乱れの非等方性がある。図4はLESの計算結果をベースに平均速度、 $k$ 、 $\epsilon$  の分布を与えて、勾配拡散モデルと代数型応力モデルを用いたときに得られるレイノルズ応力の比較を行ったものである<sup>(9)</sup>。講義(1)では、壁近傍での修正やモデル定数の変更によってバックステップ乱流の予測にかなりの改善がなされることも示した。表2に低レイノルズ数型  $k-\epsilon$  モデルのモデル関数と数値定数に関する最近の提案例<sup>(10)~(18)</sup>を示しておく。

#### 4. ラージ・エディ・シミュレーションの構成とSGSモデル

計算格子がDNSに対しては十分ではないが、エネルギー保有領域を解像できる程度には分割されているとしよう。乱流の速度場を計算格子で解像できる低波数の成分(以下GS(Grid Scale)成分とよぶ)とそれより高波数の成分(以下SGS(Subgrid Scale)成分とよぶ)に分離できれば、流れ場全体の特性は乱れエネルギーの大部分を占めるGS成分によって“ほぼ”表現されるであろう。このような低波数のGS成分はNavier-Stokes方程式の解を“粗視化”(時間平均と区別するために以下このようによぶことにする)したものと理解できる。すなわち、LESでは、DNSにおけるNavier-Stokes方程式のかわりに“粗視化”されたGS成分の方程式を用いることで、必要な計算負荷をDNSに比べて大幅に緩和することができる。特に高レイノルズ数乱流においては慣性小領域をはさんでエネルギー保有スケールとコルモゴロフ粘性散逸スケールが離れていくので、その効果は大きい。ただし、その代償として残りのSGS成分についてはモデル化が必要となる。

ところで、本稿第1章で述べたように、乱流解析として成功を取めているもうひとつの方法として、レイノルズ平均(RANS)モデルがあるが、このアプローチにおいては、時間的(あるいは、アンサンブル的)に平均した運動方程式を解いて

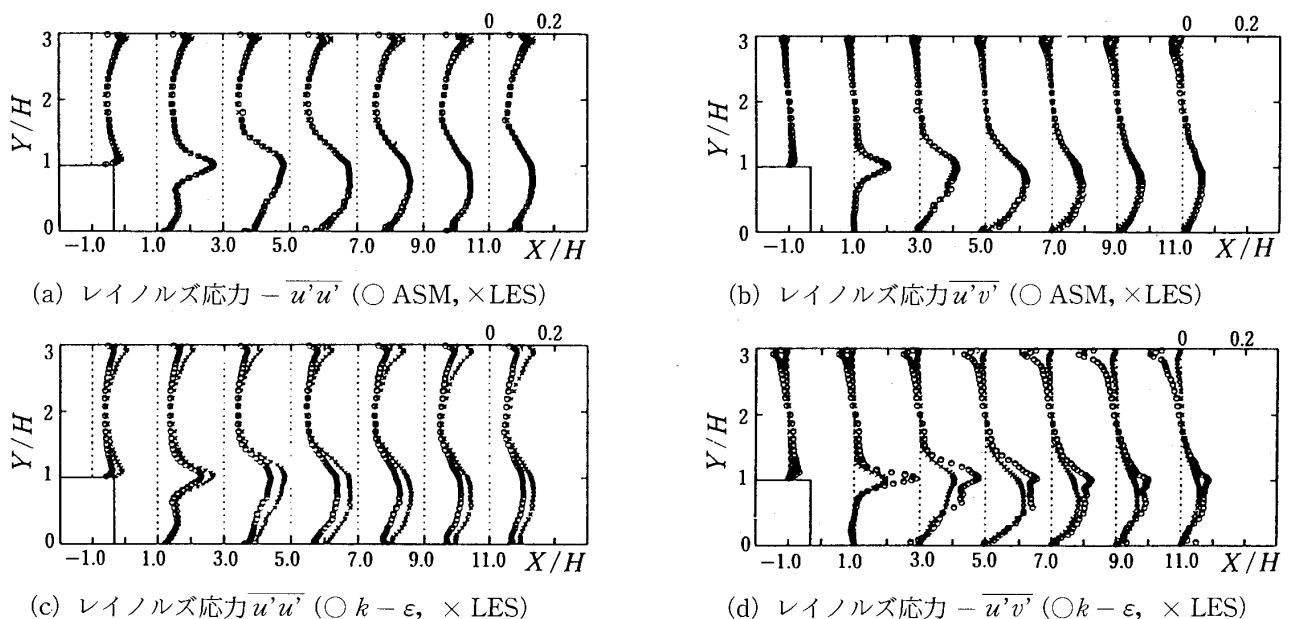


図4 バックステップ乱流における勾配拡散モデルと代数応力モデルの比較

表2 低レイノルズ数型 k-ε モデルのモデル関数と数値定数

$$\frac{Dk}{Dt} = D_k + P_k - (\bar{\epsilon} + D) \quad \epsilon = \bar{\epsilon} + D \quad \frac{D\bar{\epsilon}}{Dt} = D_{\bar{\epsilon}} + \frac{\bar{\epsilon}}{k} (C_{\epsilon 1} f_1 P_k - C_{\epsilon 2} f_2 \epsilon) + E$$

ただし、Yang-Shih モデルでは  $\frac{D\bar{\epsilon}}{Dt} = D_{\bar{\epsilon}} + (C_{\epsilon 1} f_1 P_k - C_{\epsilon 2} f_2 \bar{\epsilon}) / \tau + E, \tau = \left(\frac{k}{\epsilon}\right) + \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}$

$$\nu_t = C_{\mu} f_{\mu} k^2 / \epsilon \quad \text{ただし、Yang-Shih モデルでは } \nu_t = C_{\mu} f_{\mu} k \tau$$

$$R_k = \frac{k^2}{\nu \epsilon} \quad R_y = \frac{\sqrt{k} y}{\nu} \quad y^+ = \frac{y}{\eta} \quad \eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4} \quad \ell = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad f_3 = \begin{cases} 1 & (y^+ \geq 5) \\ 1 - \exp(-R_t^2) & (y^+ < 5) \end{cases}$$

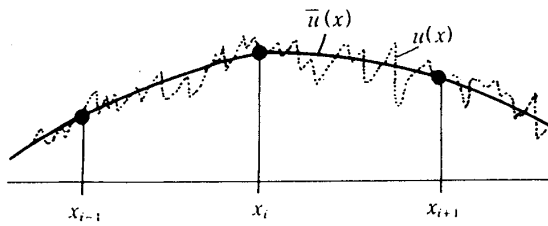
$$a_5 = 5 \times 10^{-4}, \quad a_6 = 5 \times 10^{-7}, \quad a_7 = 1 \times 10^{-10}, \quad C_1 = 0.74, \quad C_{\nu} = 0.0006, \quad D_{\nu} = 100$$

モデル	Standard	Jones-Launder	Launder-Sharma	To-Humphrey	Myon-Kasagi
文献		(10)	(11)	(12)	(13)
D	0	$2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$	$2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$	0	0
E	0	$2\nu\nu_t(\partial^2\bar{U}/\partial y^2)^2$	$2\nu\nu_t(\partial^2\bar{U}/\partial y^2)^2$	0	0
ε, ε̄ の 壁面境界条件	Wall function	$\bar{\epsilon} = 0$	$\bar{\epsilon} = 0$	$\epsilon = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$	$\epsilon = \nu^2 k / \delta^2$
C <sub>μ</sub>	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
C <sub>ε1</sub>	1.44	1.55	1.44	1.44	1.4
C <sub>ε2</sub>	1.92	2.0	1.92	1.92	1.8
σ <sub>k</sub>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4
σ <sub>ε</sub>	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
f <sub>μ</sub>	1.0	$\exp\left(\frac{-2.5}{1+R_t/50}\right)$	$\exp\left[\frac{-34}{(1+R_t/50)^2}\right]$	$\exp\left(\frac{-2.5}{1+R_t/50}\right)$	$\left\{1 - \exp\left(-\frac{y^+}{70}\right)\right\} \left\{1 + \frac{3.45}{R_t^{1/2}}\right\}$
f <sub>1</sub>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
f <sub>2</sub>	1.0	$1 - 0.3 \exp(-R_t^2)$	$1 - 0.3 \exp(-R_t^2)$	$(1 - 0.3 \exp(-R_t^2)) f_3$	$\left[1 - (2/9) \exp\left\{-\left(R_t/6\right)^2\right\}\right] \left[1 - \exp\left(-y^+/5\right)\right]^2$

モデル	山川	Michelassi-Rodi	Abe-Nagano	Yang-Shih	村上-加藤-近本
文献	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
D	0	$\epsilon \exp(-0.09R_y)$	0	0	0
E	0	$-12\nu_t \left(\frac{\partial^2\bar{U}}{\partial y^2}\right)^2$ $-0.0085\nu \frac{k}{\epsilon} \left(\frac{\partial k}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial^2\bar{U}}{\partial y^2}\right)$	0	$\nu\nu_t \left(\frac{\partial^2\bar{U}}{\partial y^2}\right)^2$	0
ε, ε̄ の 壁面境界条件	$\epsilon = \nu^2 k / \delta^2$	$\bar{\epsilon} = \frac{\nu}{2k} (\partial k / \partial y)^2$	$\epsilon = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$	$\epsilon = \nu^2 k / \delta^2$	$\epsilon = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$
C <sub>μ</sub>	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
C <sub>ε1</sub>	1.45	1.44	1.5	1.44	1.5
C <sub>ε2</sub>	1.92	1.92	1.9	1.92	1.9
σ <sub>k</sub>	1.4	1.3	1.4	1.0	1.4
σ <sub>ε</sub>	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4
f <sub>μ</sub>	$\left\{1 - \frac{C_{\mu}}{R_t} \ln\left(\frac{R_t}{C_1} + 1\right)\right\} \times$ $\left[1 - \exp\left\{C_{\nu} \nu y^{+2} + \frac{D_{\nu} \nu y}{\epsilon}\right\}\right]$	$\frac{\{1 - \exp(-0.044y^+)\}^2}{\{1 + \exp(-0.12y^+)\}}$	$\{1 - \exp(-y^+/14)\}^2 \times$ $\left[1 + \frac{5}{R_t^{3/4}} \exp\left\{-\left(R_t/200\right)^2\right\}\right]$	$\left\{1 - \exp\left(-a_5 R_y - a_6 R_y^3\right)\right\}^{1/2}$ $\left\{1 - \exp\left(-a_7 R_y^5\right)\right\}$	$\{1 - \exp(-y^+/14)\} \times$ $\left[1 - \exp\left\{-R_t^{3/4}/24\right\}\right] \left[1 + 1.5/R_t^{5/4}\right]$
f <sub>1</sub>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
f <sub>2</sub>	$\left[1 - 0.3 \exp\left\{-\left(R_t/26\right)^2\right\}\right] \times$ $\left[1 - \exp\left(-y^+/4.1\right)\right]^2$	$\left\{1 - 0.22 \exp\left(-R_t^2/36\right)\right\} \times$ $\bar{\epsilon} / \epsilon$	$\left\{1 - \exp\left(-y^+/31\right)\right\}^2 \times$ $\left[1 - 0.3 \exp\left\{-\left(R_t/6.5\right)^2\right\}\right]$	1.0	$\left\{1 - \exp\left(-y^+/3.1\right)\right\}^2 \times$ $\left[1 - 0.3 \exp\left\{-\left(R_t/6.5\right)^2\right\}\right]$

平均流れ場を求めることになる。RANS 乱流モデルはこの平均操作によって現れる乱流レイノルズ応力を、または、そのレイノルズ応力の輸送方程式の中の未知の項をモデル化の対象とする。これらの RANS におけるモデル化は、乱流変動のエネルギー Spektral のほぼすべての成分に対して行われるため、得られる乱流モデルは流れ場の形

状と境界条件に大きく依存する。一方、LES でモデル化される SGS 成分は、小スケールのより等方的な変動であることから、流れ場に対する依存性が RANS モデルのレイノルズ応力に比べて小さいと期待できる。さらに、SGS 成分が平衡領域に含まれていれば、コルモゴロフの相似則によって SGS 成分のエネルギー Spektral を与えるこ



..... :  $u(x)$  は元の関数, —— :  $\bar{u}(x)$  は粗視化した関数

図5 乱流の粗視化

とができ、これに基づいて普遍的なモデル化が構成できると考えられている。

LESではGS成分を得るのに空間平均（空間フィルター）の考え方が用いられる。これは直感的には、図5のように高波数の変動を含む速度分布  $u$  を計算格子で表現できる程度の滑らかさに粗視化した関数  $\bar{u}$  で近似することと理解される。LESにおけるGS成分の方程式の導出と、SGS成分に対するLES乱流モデルの定式化の詳細については文献<sup>(19)</sup>を参照していただくとして、ここではLESの基本形のみを示しておく。

代表長さおよび代表速度で無次元化された連続の式およびNavier-Stokes方程式にフィルタリング操作を施した式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)}_{L_{ij} \text{ Leonard 応力項}} + \underbrace{\bar{u}_i \bar{u}'_j + \bar{u}'_i \bar{u}_j}_{C_{ij} \text{ Cross 項}} + \underbrace{\bar{u}'_i \bar{u}'_j}_{R_{ij} \text{ Reynolds 応力項}} \end{aligned} \tag{12}$$

式(12)中の  $L_{ij}$  と  $C_{ij}$  は強い負の相関をもつことが知られているので、 $L_{ij} + C_{ij} = 0$  と置くことも多い。また、 $R_{ij}$  のモデルとしてはスマゴリンスキー (Smagorinsky) モデルを採用する。すなわち、

$$\begin{aligned} \bar{u}'_i \bar{u}'_j = & \frac{2}{3} k_{SGS} \delta_{ij} - 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \\ \bar{S}_{ij} = & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \tag{13}$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \tag{14}$$

$$k_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}^2}{(C_K \Delta)^2} \tag{15}$$

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \tag{16}$$

ここで、式(16)中の  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  はそれぞれ、 $x_i$  方向の格子間隔を表す。

上述のスマゴリンスキーモデルは、LESにおいて現在最も多用されているSGSモデルである。このモデルの基本概念は渦粘性近似であり、渦粘性係数についてはSGSの運動に対して局所平衡が成り立つと仮定し、速度スケールにSGS乱流エネルギー、長さスケールに格子幅を仮定することで求められる。このモデルの特徴は渦粘性係数が必ず正の値をもつことからGSの流れ場は絶対的に散逸的であり、この結果、計算も一般に非常に安定して行える。また、モデル化の過程でGSとSGSスケールの明確な分離を仮定しており、この結果、統計的に見た場合、すなわち、高波数領域のモデル、散逸モデルとしては優秀であるといえる。ただし、モデルパラメータ（いわゆるスマゴリンスキー定数）をアприオリに決定してやる必要があること、壁近傍の漸近挙動を捕らえられないこと、遷移現象の予測精度が十分でないことなどの欠点を有する。また、統計的に見れば乱流場は散逸的であるが、近年、カットオフ周波数領域近辺において乱流の組織構造と強い相関をもつエネルギーのSGSからGSへの流れが存在することが指摘されているが、このモデルではこのエネルギーの逆カスケードを捕らえることができない。

このスマゴリンスキーモデルの欠点を補うべく、近年、幾つかのSGSモデルが提案されている。その主なものの歴史と特徴を図6および表3に示す。ここでは、その中のスケールシミュラリティモデル (Scale similarity model) とダイナミックモデル (Dynamic SGS model) について概要を示す。

スケールシミュラリティモデルはLESにおけるカットオフ周波数近傍において、GSの大スケールの運動とSGSの小スケールの運動がほぼ相似であると仮定することで得られるモデルであり、クロス項、レイノルズ項のモデル化として有力である。このモデルの特徴はDNSによるアприオリテストにおいて実際のSGS応力と非常に強い相関をもつことにあり、エネルギーの逆カスケードを捕らえることもできる。渦粘性モデルを用いた場合、実際のSGS応力との相関は意外に悪く、



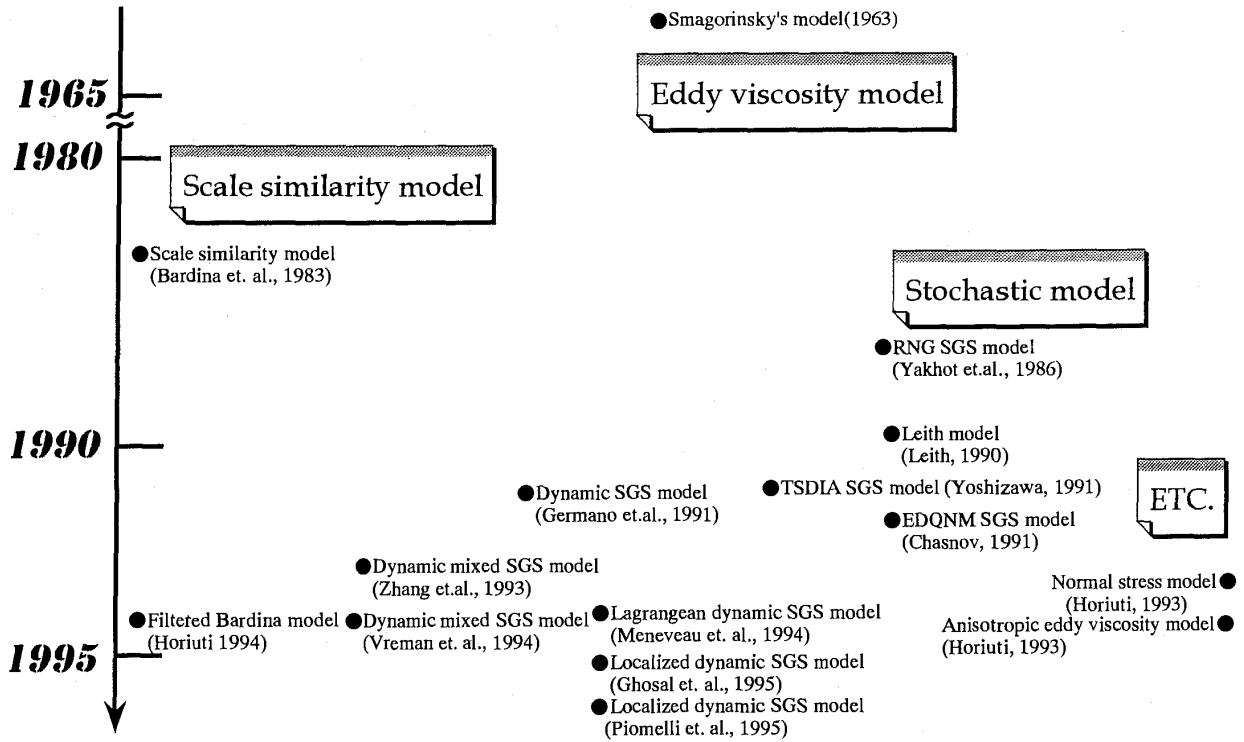


図6 SGSモデルの歴史

表3 LESにおけるSGSモデルの特徴

	model type	prediction of wall	prediction of backscattering	applicability to complicated flow	numerical instability
Smagorinsky's model(1963)	eddy vis.	×	×	⊙	⊙
Scale similarity model (Bardina et. al., 1983)	scale sim.	○	⊙	○	⊙
RNG SGS model (Yakhot et. al., 1986)	stochastic	⊙	×	○	⊙
Leith model (Leith, 1990)	stochastic	?	⊙	×	?
TSDIA SGS model (Yoshizawa, 1991)	stochastic	○	×	⊙	○
EDQNM SGS model (Chasnov, 1991)	stochastic	?	⊙	×	?
Dynamic SGS model (Germano et. al., 1991)	eddy vis.	⊙	×	⊙	×
Normal stress model (Horiuti, 1993)	eddy vis.	⊙	○	?	?
Anisotropic eddy viscosity model (Horiuti, 1993)	eddy vis.	○	○	?	?
Dynamic mixed SGS model (Zhang et. al., 1993)	eddy vis. / scale sim.	⊙	⊙	○	×
Dynamic mixed SGS model (Vreman et. al., 1994)	eddy vis. / scale sim.	⊙	⊙	○	×
Filtered Bardina model (Horiuti 1994)	scale sim.	⊙	⊙	?	?
Lagrangean dynamic SGS model (Meneveau et. al., 1994)	eddy vis.	⊙	×	○	⊙
Localized dynamic SGS model (Ghosal et. al., 1995)	eddy vis.	⊙	×	⊙	⊙
Localized dynamic SGS model (Piomelli et. al., 1995)	eddy vis.	⊙	×	○	⊙

カットオフ周波数近傍のSGSモデルとしてはスケールシミュリティモデルは非常に有力であるといえる。ただし、GSから遠く離れた高周波域における、すなわち散逸モデルとしての評価については高くない。一般にはカットオフ周波数近傍はスケールシミュリティモデル、より高波数域では渦粘性モデルが優秀であると考えられている。ただし、複雑乱流場への適用例は十分ではなく、高レイノルズ数乱流における有用性についても未確認である。

ダイナミック (Dynamic) SGSモデルはスマゴリンスキーモデルの欠点の一つであるモデルパラメータの決定を流れ場に依りて、各時間各場所で決定する手法として提案された。流れ場にGSより大きなフィルター幅を有するテストフィルタを定義し、グリッドフィルタ空間とテストグリッドフィルタ空間の相似性に着目してパラメータを決定する。SGSモデルとしてはスマゴリンスキーモデルと同様の渦粘性近似を用いるため、パラメータ決定の際に渦粘性係数の負値に起因する数値不安定性がおこることが知られている。一般にはこの問題を避けるため、乱流場の一様方向に求めたパラメータを平均するという手法がとられる。このことが、このモデルの複雑乱流への適用を妨げている。また、渦粘性近似を用いた場合、渦粘性モデルの持つ欠点はそのままだけに現れる。ただし、ダイナミックSGSモデルの概念は渦粘性モデルにとどまらず、他のモデルのパラメータ決定の手法としても有効であり、たとえばレイノルズ応力項のスケールシミュリティモデルによるモデル化の

際のパラメータ決定法としても有力であると考えられている。壁近傍の漸近挙動の予測、遷移問題についても有力であることが確認されている。

5. LESによる乱流解析例

ここでは工業上の流れにLESを適用することを念頭において、スマゴリンスキーモデルと比較的粗い格子数で解析した例を紹介しておく。流れ場の形状が簡単なことから、2次元正方形柱まわりの乱流解析が精力的に行われている。図7のように計算領域を選定したときの、レイノルズ数に対する正方形柱の抗力係数、背圧係数およびストロハル数の変化を図8に、水平平面内の $\bar{u}$ および

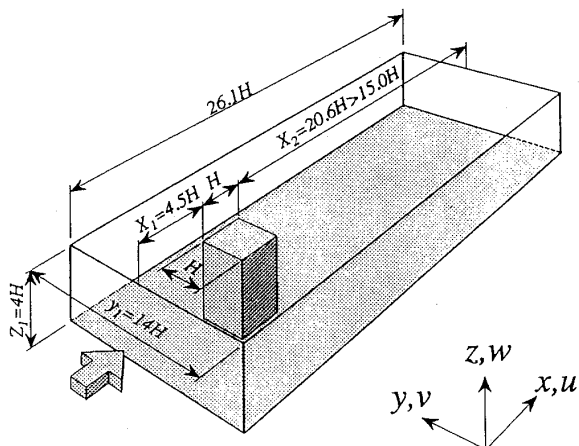
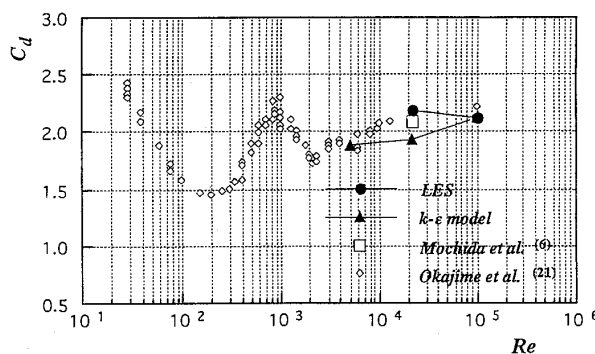
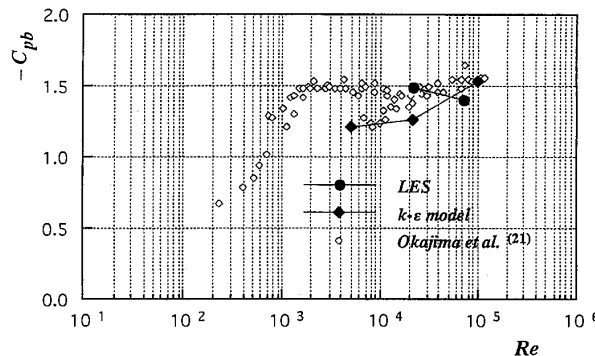


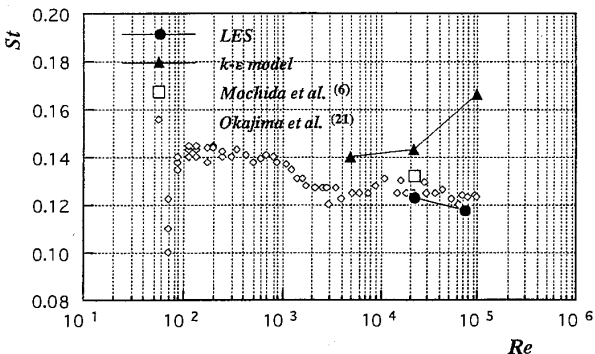
図7 正方形柱の計算領域



(a) レイノルズ数に対する抗力係数の変化



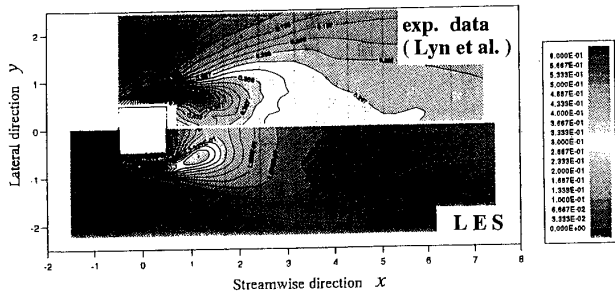
(b) レイノルズ数に対する背圧係数の変化



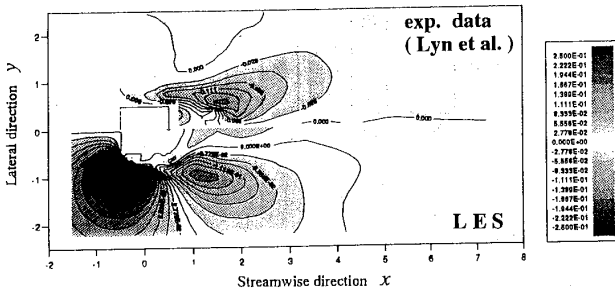
(c) レイノルズ数に対するストロハル数の変化

図8 レイノルズ数に対する抗力係数、背圧係数、ストロハル数の変化

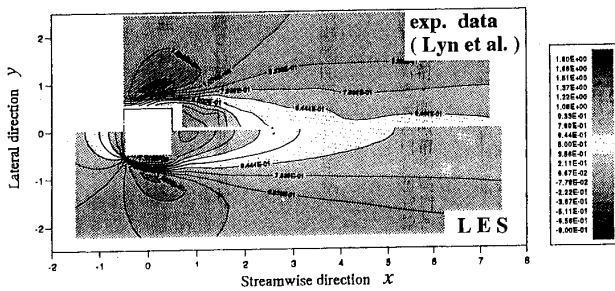
$\overline{u_i u_j}$  の等値線を図9に、それぞれ実験値と比較して示す<sup>(20)</sup>。さらに、1995年6月にミュンヘン郊外



(a) Time-averaged turbulent intensity,  $\overline{u'u'}$



(b) Time-averaged turbulent intensity,  $\overline{u'v'}$



(c) Time-averaged velocity,  $\overline{u}$

図9 速度, 乱れ強度の時間平均値の実験値との比較

で開催された国際 LES ワークショップ<sup>(21)</sup>に発表された上述の正方形柱まわりの乱流解析結果の一例を表4に示す。現在のところ、乱流量に対する統一的评价は行われていないが、渦振動数や変動揚力, 抗力係数等のオーバーオール値は実験結果をよく表現している。この背景の下に、強制振動する正方形柱背後の渦のロックイン現象を解析した例を図10に示す<sup>(22)</sup>。

最後に、流体音への LES の適用という試みを紹介しておく。図11に示す円柱背後の渦が発生する流体音を横1mの位置にいる人が聞くであろう音圧レベルとして予測したものが図12である<sup>(23)</sup>。実測値とかなりよい一致を示しており、LESによって平均速度場が精度よく計算される

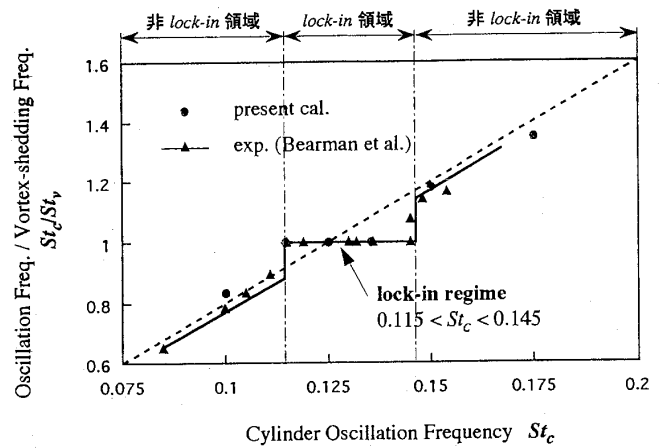


図10 強制振動する角柱背後の渦のロックイン現象の再現

表4 正方形柱に作用する抗力と渦振動数の数値計算一覧

Contribution	Convection Scheme	SGS Model	Grid	Cd	St
田村	K-K Scheme	—	202*100*102	—	—
小林	QUICK	Smagorinsky	83*63*16	2.04	0.13
カールスルーエ大学1	Central (2nd)	Smagorinsky	109*105*20	2.20	0.13
カールスルーエ大学2	Central (2nd)	Smagorinsky	146*146*20	2.30	0.13
マンチェスター工科大学2	Central (2nd)	Dynamic	140*81*13	2.02	—
村上	Central (2nd)	Dynamic Mixed	109*92*22	2.06	0.13
exp. (Lyn)	—	—	—	1.9 - 2.1	—
exp. (Cheng)	—	—	—	—	0.132

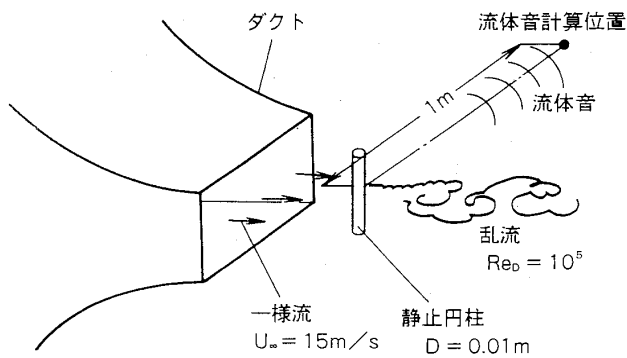


図11 円柱背後の渦が発生する流体音

ような流れ場における遠距離場の音が近い将来には予測されるという期待をもつことができる。

## 6. おわりに

本稿では非圧縮性流体のLESを中心に乱流モデルに関する最近の動向を述べた。非圧縮性流体の乱流モデルについては多くのノウハウが蓄積されつゝあり、また、DNSデータの利用による乱流モデルの高精度化も進められている。高精度乱流モデルの効果はグリッド生成を含む数値計算法の高精度化を必要とするが、非圧縮性乱流モデルについては行き先も定まりつゝある。したがって、次の目標は圧縮性流体の乱流モデルであろう。これら非圧縮性流体に対する知識を基礎に、圧縮性流体の乱流モデルの研究が精力的に行われ始めている。

一方、RANS乱流モデルが非定常乱流を表現できるかどうかは未確定である。現状では非定常性の表現にはLESの方が遙かに有利である。その意味で、今後、LESの実現象への適用が進むであろう。

## 参考文献

- (1) 数値流体力学編集委員会編, 数値力学力学シリーズ3 乱流解析 (1995), 東大出版会
- (2) Kim, J., Moin, P., & Moser, R., J. Fluid Mech., 177 (1987), 133
- (3) Le, H. & Moin, P., TF-58, Dept. of Mech. Engg., Stanford University (1994)
- (4) Launder, B. E., Reece, G.J. & Rodi, W., J. Fluid Mech., 68 (1975), 537
- (5) 小林, 日本ガスタービン学会誌, 22-88(1995), 75.
- (6) 小林, 依田, 機械学会論文集B, 52-481 (1986), 3230

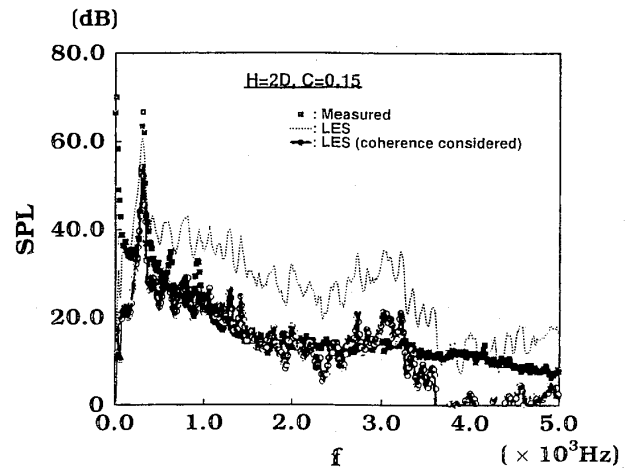


図12 音のスペクトルの再現

- (7) Katoh, M., Lander, B. E., Proc. 9th Symp. Turbulent Shear Flows (1993), vol. 1, 10-4
- (8) 機械学会 RC 104 報告書 (1994), 90.
- (9) 保原・大宮司編, 数値流体力学・基礎と応用, 東大出版会 (1992), 255.
- (10) Jones, W. P. & Launder, B. E., Int. J. Heat Mass Transer, 15 (1972), 301
- (11) Launder, B. E. & Sharma, B. I., Letters in Heat and Mass Transfer (1974), 1, 131
- (12) To, W. M., & Humphrey, J. A. C., Int. J. Mass Heat Transfer 29 (1986), 573
- (13) Myong, H. K. & Kasagi, N., JSME Int. J. Fluids Eng., 109 (1990), 156
- (14) 山川正剛, 博士論文 東京大学 (1991)
- (15) Michelassi, V., Rodi, W & Scheuerer, G., Proc. 8th Symp. Turbulent Shear Flows (1991), vol. 2, 26-5
- (16) Abe, K. Nagano, Y. & Kondo, T., J. Wind Eng., 52 (1992), 213
- (17) Yang, Z., & Shih, T. H., AIAA J., 31 (1993), 1191
- (18) 村上, 加藤, 近本, 建築学会大会学術講演梗概集 (1993), 737
- (19) 数値流体力学編集委員会編, 数値力学力学シリーズ3 乱流解析 (1995), 76, 東大出版会
- (20) Kogaki, T. Kobayashi, T. & Taniguchi, N., Proc. Mathematical Modelling of Turbulent Flows (1995), 217
- (21) Rodi, W. & Ferziger, J. H., Workshop on Large Eddy Simulation of Flows past Bluff Bodies 資料
- (22) 小垣, 岡島, 小林, 機械学会論文集投稿中
- (23) 加藤, 機械学会論文集 B, 60-569 (1994), 126

# 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 (第一報)

東海大学	伊藤高根
東京大学	石谷久
(財)日本自動車研究所	住江新
東燃(株)	伊藤卓爾
(財)石油産業活性化センター	半田統敏
(財)エネルギー総合工学研究所	蓮池宏

## Abstract

Fuel economy of a city bus, driven by 4 types of driving system, was evaluated by a newly developed simulation program. Driving systems considered were two types of 100kW-CGT (Ceramic Gas Turbine)/Electric hybrid engine system (series and parallel hybrid), conventional 168kW-diesel engine and 168kW-CGT engine. Total fuel consumption of each bus driven on two kinds of driving mode was calculated. One was a City-Bus Mode which was made from data of one of the bus service lines in Tokyo, and the other was 10-15 Mode set for passenger cars. The results showed that a series type CGT/Electric hybrid system was the most efficient and its fuel economy was more than 1.5 times compared with a conventional diesel engine driving system. It was also showed that the total regenerative kinetic energy when a bus was decelerated reached to about 60% of the total driving works on a city bus mode.

## 1. はじめに

都市における大気環境基準はますます厳しさを増す傾向にあり、米国カリフォルニア州では排気ガスを出さない ZEV (Zero Emission Vehicle) を 1998 年より段階的に導入することをメーカーに義務づける動きとなっている。ZEV は電気自動車を実質的に意味するが、長年の研究開発にもかかわらず航続距離、最高速度、充電のわずらわし

さ等の問題があり、ユーザの満足する性能を確保することは容易でない。そこで、排気もきれいで、車両性能にもすぐれた自動車用駆動システムとして、別途開発が進められている小型セラミックガスタービン<sup>(1)</sup>を用いて電池と組み合わせたハイブリッドエンジンシステムを考え、性能シミュレーションプログラムを開発し、これを用いて都市内路線バス、2 トン積みトラック、2000 cc 級乗用車へ適用した場合のガスタービンハイブリッドシステムの特性及び可能性を検討した。第一報として路線バスへ適用した場合の走行燃費についての検討結果を報告する。

## 2. 性能解析プログラムの概要

自動車の燃費、排気特性の評価は、車種によって予め定められた運転モードにしたがって走行したときの燃料流量、排気ガス量によって行われる為、解析プログラムも、ある運転モードを走行したと仮定して時々刻々の必要駆動トルクを計算し、その時の各機器の作動点効率から燃料流量、排出ガス量を算出し積算できるようなものになっている。プログラムは電気自動車用に開発<sup>(2)</sup>したものをベースにハイブリッドシステム用に拡張したもので、比較のためにエンジン単独で駆動する従来方式の車両についても解析できるようになっている。以下にその主要要素機器のモデル化の概要を示す。

### (1) エンジン

加減速を含む運転では正確にはエンジンの過渡性能を考慮する必要があるが、準定常の扱いができるかと仮定し、回転系の慣性の影響のみを考慮した。したがって、エンジン特性は回転数と燃料流量をインプットとして、その時のエンジン出力(ま

(平成 7 年 7 月 13 日原稿受付)

たは軸トルク), 排出ガス量が算出できるような静特性マップを用いている。100 kW 一軸式セラミックガスタービン (CGT) の出力特性は文献(1) の設計時の特性を流用した。

(2) トランスミッション

一軸ガスタービンはトルク特性が右上がり特性のため直接駆動する場合やパラレル方式のハイブリッドシステムの場合には無段変速機 (CVT) が必要で, CVT としては大馬力に対応できるトラクション式のものを考えた。その具体的構成, 性能データは上記の CGT 用に検討した英国トロトラック社のトロイダル式 IVT システムを参考にモデル化した。

(3) モータ及び発電機

モータ及び発電機の形式は現在実用化されている誘導式と最近小型で高性能化の期待される永久磁石 (PM) を用いた同期機の二種類をモデル化した。何れもインバータを用いたベクトル制御を行なうことを前提に, 等価回路を仮定してこれらの機器の各瞬間の作動点における効率を算出している。損失は負荷 (電流) に影響されないもの (鉄損, 機械損等) と, 影響されるもの (銅損等) とにわけて計算し, 最後にインバータ損失を加味して全体効率を計算するモデルとなっている。

(4) バッテリ

バッテリーは種々の方式のものが研究開発中であるが, 現状で最も実用的なものとして密閉式鉛蓄電池をモデル化した。電池の特性を充放電を含め

て正しく推定することは現状では困難であるが, 鉛電池の定常充電特性, 放電特性を各放電深度 (DOD) 毎に実験した実験結果<sup>(3)</sup> を基に, 電池の起電力と, 内部抵抗を DOD の関数として求めた。

3. 都市内路線バス用ハイブリッドシステムの解析

自動車用エンジンの内, 排気性能改善の面で最も苦慮しているのはディーゼルエンジンであり, また排気問題が最も厳しいのは都市内である。その様な観点から都市内をディーゼルエンジンで走行している路線バスの駆動系に排気特性に優れたガスタービンを用いたハイブリッドシステムを考え, これを適用した場合の走行燃料について先ず検討した。

(1) ベース車両及び解析対象システム

解析のベースとして現在路線バスで使用されているディーゼルエンジン直接駆動の車両 (DIE. D) を選び, そのエンジンを, 同一出力のガスタービン + IVT の駆動システム (CGT. D), 図 1 に示すような CGT を用いたハイブリッドシステム (シリーズ方式 (S. HYB) 及びパラレル方式 (P. HYB) にそれぞれ置き換えた場合の特性をそれぞれ比較した。解析に用いた車両諸元, 駆動系諸元を表 1 に示す。

表 1 車両及び駆動系の諸元

項目	単位	直接駆動SYS		ハイブリッドSYS	
		DIE. D	CGT. D	S. HYB	P. HYB
車両総重量	kg	13.345	13.345	14.730	13.765
全面投影面積	m <sup>2</sup>	7.00	←	←	←
転がり抵抗係数		0.012	←	←	←
Cd値		0.500	←	←	←
タイヤ有効半径	m	0.508	←	←	←
変速機形式		5速手動	IVT	—	IVT
最終減速比		6.428	←	←	←
エンジン形式		DIESEL	CGT	CGT	CGT
最大出力	kW	168	←	100	←
最高回転数	rpm	2.300	6.000	←	←
モータ形式		—	—	PM	←
最大出力	kW	—	—	172	80
最高回転数	rpm	—	—	2.834	←
重量	kg	—	—	425	250
発電機形式		—	—	PM	—
最大出力	kW	—	—	100	—
最高回転数	rpm	—	—	10.000	—
重量	kg	—	—	90	—
電池形式		—	—	鉛電池	←
エネルギー密度	Wh/kg	—	—	400	←
出力密度	W/kg	—	—	200	←
重量	kg	—	—	645	420

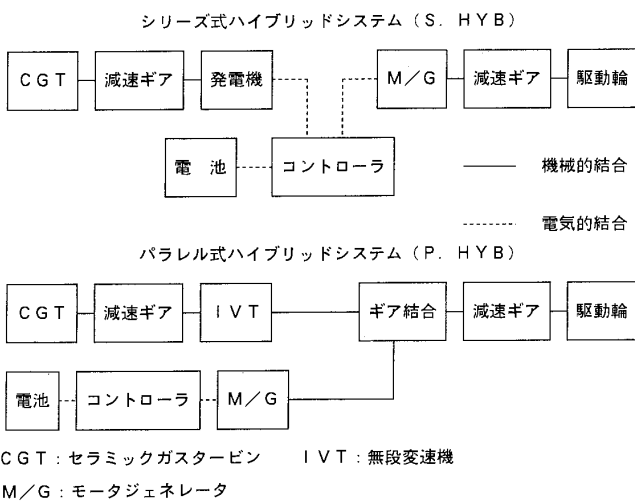


図 1 CGT を用いたハイブリッドシステムの構成ブロック図

解析のベースとなるディーゼルエンジンは最大出力 168 kW である。ガスタービン単独駆動の場合のエンジン出力は同じく 168 kW としているが、その特性は 100 kWCGT の空気流量が単純に 1.7 倍になったとし、その特性はまったく変わらないと仮定した。ハイブリッドシステムの場合はエンジン最大出力、モータ最大出力、バッテリー容量等の選択には最適な関係があると思われるが、今回はシリーズ方式もパラレル方式もエンジン最大出力は 100 kW とし、前述の 100 kWCGT の設計時点の特性図をそのまま用い、モータ出力等については予め定めた車両の目標走行性能を満足するように概略設計を行い決定した。モータは PM 式の同期機とし、最大出力はシリーズ方式では 172 kW、パラレル方式では 80 kW となった。ベースとなるモータ特性を基にそれぞれの容量を考慮して特性を計算した。発電機はエンジン出力に合わせて最大出力 100 kW である。バッテリーは基本のモジュールを必要個数並べて組電池として使用するが、組電池の定格電圧（基本モジュールの直列個数）はシリーズ方式もパラレル方式も同じく 300 V とし、電気容量（電池全重量に比例）は各車種の基本仕様に応じて設定した。

#### (2) 運転モード

大型のディーゼルエンジンやバスについては特に定められた走行モードは無く、エンジンに対し

て定常運転の積み重ねである 13 モード等が定められている。しかしながら現実には都市内を走る路線バスでは信号、停留所等による加減速の連続であり、実体を表すには定常状態の積み重ねでは不十分であり、またエネルギー回生の効果等の評価もできない。そこで今回は東京都内のある路線を走行して得られた実測値を基に作成した「バス実走行モード」と乗用車用に定められている「10-15モード」を対象に解析を行った。「バス実走行モード」は走行距離約 2 km、平均車速 12.5 km/h である。なお、走行モードに応じた CGT エンジンの燃料制御は、事前検討の結果、タービン入り口温度一定制御が最も効率が高かったため今回はその方式を採用した。

#### 4. 駆動システム効率に関する計算結果と考察

##### (1) 各駆動システムの比較

表 2 及び図 2 に走行モード別に各駆動システムの単位発熱量当たりの走行距離（走行燃費: km/kWh）を DIE, D に対する相対比較で示す。ベースとなるディーゼルエンジンの実走行モードに対する計算結果は約 1.6 km/l で概ね実際のバス路線で経験されている値と大差無く、シミュレーションの結果はほぼ妥当と判断された。実走行モードの場合、シリーズハイブリッド方式が最もよく、次いでパラレルハイブリッド方式でそれぞれ 67%、35% 程度の改善結果が得られた。一軸

表 2 各走行モードに於ける各システムの計算結果

走行モード	駆動システム	10-15 走行モード				バス実走行モード				
		DIE	DCGT	DS	HYBP	HYB	DIE	DCGT	DS	HYBP
走行距離	m	4160.5	4161.4	4160.6	4161.4	2090.4	2089.7	2090.2	2090.4	
平均車速	km/h	22.7	22.7	22.7	22.7	12.5	12.5	12.5	12.5	
必要駆動仕事	kWh	5.251	4.894	5.275	4.998	3.443	3.036	3.199	3.039	
燃料消費量	kWh	17.495	15.642	11.173	13.444	12.665	10.57	7.593	9.364	
走行燃費	km/kWh	0.238	0.266	0.372	0.31	0.165	0.198	0.275	0.223	
走行燃費(相対)		1	1.118	1.563	1.303	1	1.2	1.667	1.352	
駆動システム効率		0.3	0.313	0.472	0.372	0.272	0.287	0.421	0.325	
同上(相対)		1	1.043	1.573	1.24	1	1.055	1.548	1.195	
エンジン平均効率		0.332	0.392	0.404	0.403	0.318	0.375	0.394	0.39	
I.V.T 平均効率		-	0.842	-	0.838	-	0.83	-	0.822	
変速機平均効率		0.901	-	-	-	0.828	-	-	-	
モータ平均仕事		-	-	5.977	1.315	-	-	3.921	1	
モータ平均効率		-	-	0.883	0.786	-	-	0.816	0.583	
発電機平均効率		-	-	0.917	-	-	-	0.914	-	
回生可能仕事	kWh	2.596	2.268	2.468	2.32	2.256	1.877	1.948	1.854	
回生可能仕事比率		0.494	0.463	0.468	0.464	0.655	0.618	0.609	0.699	
モータ回生効率		-	-	0.873	0.775	-	-	0.778	0.576	
充電忌避電力量	kWh	-	-	0.224	0.384	-	-	0.226	0.174	

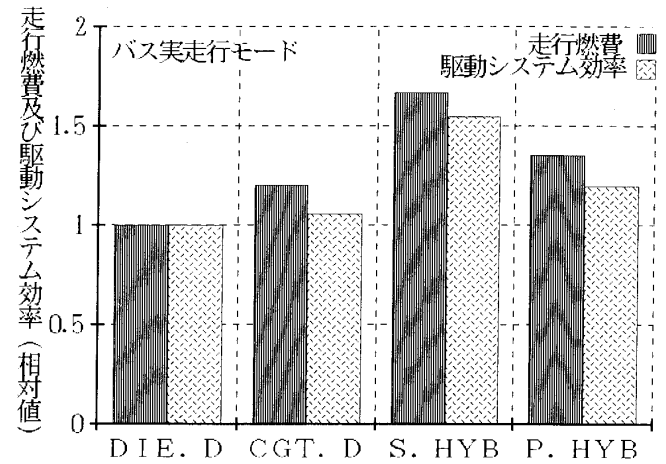
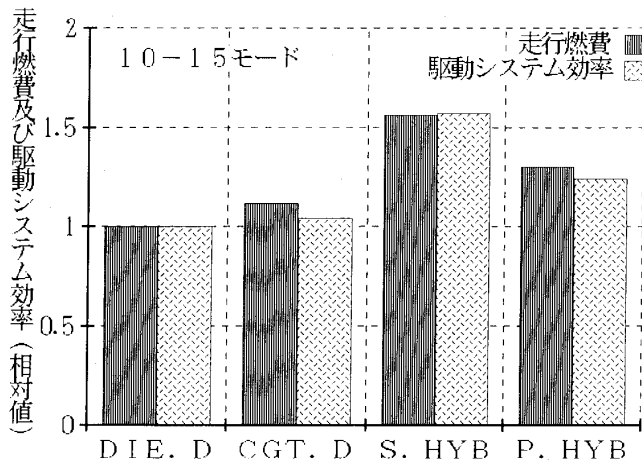


図2 各走行モードに於ける走行燃費及び駆動システム効率 (相対値)

CGTの直接駆動は約20%、良い結果となっている。10-15モードの場合もハイブリッドが良くそれぞれ56%、30%の改善効果が得られている。

上記の指標は通常よく使われる走行燃費 (km/l)と同じであるが、重量の重い場合は走行燃費は悪くなり回転系の等価重量も含めた車両の全重量の違いが結果に反映されてしまうため、重量の違い各種駆動システムの効率を横並びに評価するには必ずしも適当ではない。そこで新たな指標として次に定義する「駆動システム効率」を導入して比較してみた。

駆動システム効率 = [必要駆動仕事] / [実際に消費した燃料の低位発熱量換算発生エネルギー] ここに、必要駆動仕事とは、車両があるモードで走るとき、プラスの駆動力が為す仕事量の積算値を言う。なお、マイナスの駆動力の為す仕事量が回生可能仕事に相当する。

表2及び図2に示すように、10-15モードの場合、ベースとなるDIE. Dの駆動システム効率0.3を1とするとS. HYBは1.573、P. HYBは1.240、CGT. SYSの場合は1.043となった。実走行モードでも同じ傾向であるが、10-15モードに比べ少しづつ効率は落ちており、平均負荷が低くなっているためと思われる。

このような結果が得られた理由を明らかにするため、燃料から発生したエネルギーがそれぞれの駆動システムの中でどのように変換されているかを解析した。DIE. DとCGT. Dのように直接車両を駆動している場合は単にエンジン及び伝達系の効率に応じて順次損失分が差し引かれるだけであるか

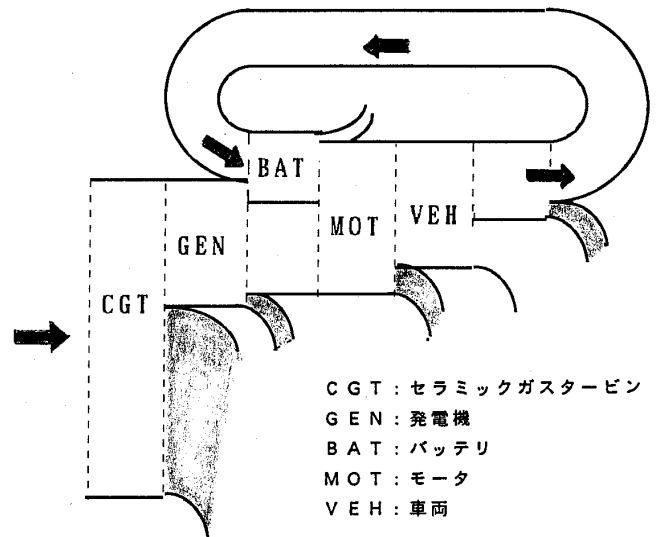


図3 S. HYBの熱勘定

ら単純である。まず10-15モードの場合のDIE. DとCGT. Dとを比べてみるとエンジン平均効率はDIE. Dの0.332に対してCGT. Dは0.392と高いが、変速機効率は逆にDIE. Dが0.901、CGT. Dが0.842であり、これらの積はそれぞれ0.299、0.330となり、これが駆動システム効率の差となってあらわれている。

これに対し、ハイブリッドエンジンシステムの場合には、モータへの供給電力はバッテリーからの部分と発電機から直接供給される部分があり、また減速時には運動エネルギーの一部が回生される等極めて複雑になる。例としてS. HYBの場合の熱勘定を図3に示す。左端の矢印はエンジンに供給されるインプットエネルギー、右端の矢印は回生されたエネルギーを示す。なお影の部分はそれぞれの



要素での損失エネルギーを示す。回生し得るエネルギーは走行モードによっても、車両重量によっても異なる。このエネルギーの回生はモータを発電機として作動させ回収するため実際に回生され利用されるエネルギーは、その時の発電機効率、バッテリーへの充電効率、バッテリーからの放電効率等が影響する。またバッテリーが既に十分な充電状態にあればいくら回生可能エネルギーがあってもバッテリーに充電することはできない。これらの状況はバッテリーのDOD管理も含めたシステムの総合制御方式にも関係する。まず最も駆動システム効率の良かったS. HYBについて10-15モードにおけるエネルギーの変換、伝達状況を検討した。エンジンの平均熱効率は0.404と高く、またエンジンによって駆動されている発電機の平均効率は0.917であった。発電機の電気出力はモータを駆動するのに使われるが、同時に一部電池を充電するために使われる。モータの平均効率は0.883であり、エンジン—発電機—モータの経路によるエネルギーの総合伝達効率はこれらの積であるとする0.327となり、この値は直接ガスタービンで駆動しているCGT.D効率0.330よりも悪い。しかしながらS. HYBの駆動システム効率が1.5倍も高いのは減速エネルギーを回生している為である。モード走行中、車輪駆動軸が負のトルクを受ける期間の仕事量を積算した値を回生可能仕事と定義すると、S. HYBの場合は2.468 kWhであり、このモードを走行するのに必要な必要駆動仕事量5.275 kWhの約47%にも相当する。この割合は走行モードによっても異なりバス実走行モードの場合は61%であった。これ等がすべて回収できるわけではないが回収可能仕事がいかに大きいかかわかる。10-15モードの場合はモータの回生モードの効率は0.873であった。この電力は電池に充電される時の損失、放電する時の損失を差し引いてはじめて有効なエネルギーとなる。また、電池の寿命の観点から充電時の端子電圧が高すぎると良くないため、今回の計算ではその上限電圧を定格電圧の1.25倍に設定し、この値よりも電圧が高くなるような条件の場合にはいくら回生エネルギーがあっても回生できないようにした。10-15モードの場合、この充電忌避電力量は0.224 kWhでありモータで回生された発電電力量の約10%程度で

あった。加減速のより厳しい実走行モードでは15%を越えている。従ってこの上限電圧を幾らにするかによっても回生エネルギー量は変わり全体の駆動システム効率にも10%以上影響する可能性があることが判った。

## (2) シリーズ式ハイブリッドシステムとパラレル式ハイブリッドシステムの比較

今回の計算では駆動システム効率は直接駆動よりもハイブリッドシステムの方が高く、S. HYBとP. HYBとを比較するとS. HYBの方が良い結果となった。その違いが何によるものかを10-15モードの場合を中心に検討した。まず駆動システムの違いを見ると表1に示すように、CGTは両者とも100 kWである。P. HYBの場合はエンジンでも直接駆動するためIVTが必要であるがモータ容量、電池容量は小さくて良く、さらに発電機が不要なため車両の総重量は結果的には1 t近く軽くなっている。まずエンジン平均効率を比較すると表2に示すように0.403と0.404で同じであり、その後に接続されているIVTの効率は0.838で、この値はS. HYBの発電機効率0.917とモータ平均効率0.883を掛けた値0.810よりも高い。一方モータによる駆動部分を比較すると、P. HYBのモータ平均効率は0.786で0.883に比べてかなり落ちている。この結果は平均車速のより低くなるバス実用走行モードではさらに顕著であり、P. HYBのモータ平均効率は0.583まで下がっている。両システムではモータの大きさ、使い方が異なり作動点に違いがあるためと思われる。またP. HYBの場合、モータへの電力供給は電池よりなされ、エンジン-IVT-モータジェネレータの経路、または回生エネルギーをモータジェネレータにより回生する経路により電池に充電されたものが使われるからIVTの効率がS. HYBの発電機効率より低い点とモータの回生モードの効率がかなり低い点(図4)は電池への充電効率をかなり悪化させていることになる。次に回生エネルギーについて比較検討した。回生可能仕事量は車体重量が軽い分P. HYBの方が僅かに少ないがこれを電気エネルギーに変換するモータの回生モードの効率がP. HYBの場合は0.775と10ポイントも低く、実走行モードでは0.576と20ポイントも低い。なお充電時の端子電圧の制限に懸かり回生で

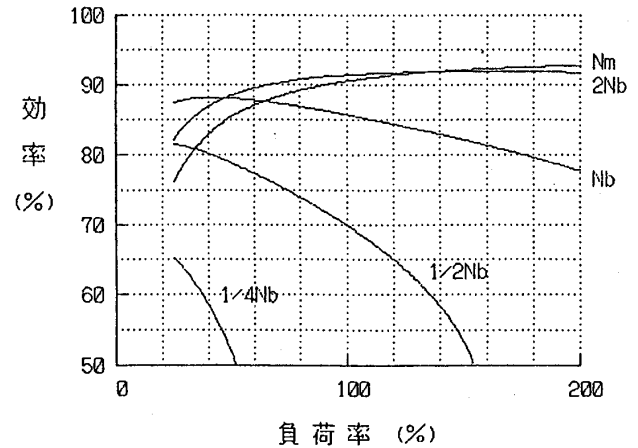
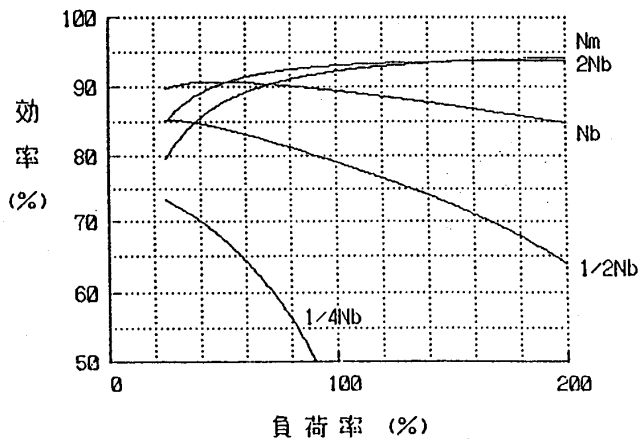


図4 各モータの回生モード効率特性 (Nb: ベース回転数, Nm: 最高回転数)

きなかった充電忌避電力量は走行モードにより傾向は逆になった。

以上をまとめると、P. HYBがS. HYBより走行燃費においても駆動システム効率においても悪くなっている原因は、モータ容量が小型になるため駆動及び回生時の効率、特に低回転時の効率が悪化する点、発電機の効率に比べIVTの効率が低い点等があげられる。しかしながらこれらの影響度合はエンジン容量、モータ容量、電池容量等の選定、システム制御の仕方にもよると思われる。今回は同一の出力のCGTを用い最高出力がベースのディーゼル車と同じになるような条件で比較をしたが、今後それぞれのシステムを最適化し、お互いが最適化された条件のもとで比較する必要があると思われる。

## 5. まとめ

最も排気清浄化が期待される都市内路線バスを対象に、現用ディーゼルエンジンよりも排気特性に優れたセラミックガスタービン(CGT)を用いた電池のハイブリッドシステムを考え、シミュレーションプログラムを開発し、それを用いてモード走行時の走行燃料を中心に従来の直接駆動システムと比較してハイブリッドシステムの燃費向上の可能性を検討した。比較対象とした直接駆動システムは現用ディーゼルエンジンおよびCGTエンジンである。その結果次のことがわかった。

- (1) CGTハイブリッドシステムはシリーズ方式でもパラレル方式での直接駆動システムよりもエネルギー効率に優れている。
- (2) ハイブリッドシステムの効率が良いのは減速エネルギーの回生が可能である点が多い。
- (3) 回生可能仕事の必要駆動仕事に対する割合は、走行モードによるが10-15モードで50%弱、バス実走行モードでは60%以上もあり、回生エネルギーの有効利用の良否が駆動システムの良否を決定する。
- (4) ハイブリッドシステムの中ではシリーズ方式の方がパラレル方式よりも良かった。その主原因は減速機(IVT)と発電機の効率の違い、パラレル方式における小型モータの作動点の不適性及び効率の悪化があげられる。
- (5) 車両重量の異なる駆動システムの性能比較には今回導入した駆動システム効率は有用である。
- (6) ハイブリッドシステムはエネルギーの流れが複雑であるから各機器の特性に敏感に影響を受ける。今後はシステムとしての最適化が重要であり、排気特性への影響も検討する必要がある。

## 参考文献

- (1) 自動車用セラミックガスタービン技術開発報告書(PEC-91C01), (財)石油産業活性化センター, 1992
- (2) 石谷他, シミュレーション, 第10巻, 第1号, 日本シミュレーション学会, 1991
- (3) 自動車用CGTハイブリッドシステムに関する報告書(PEC-92C04), (財)石油産業活性化センター, 1993

川崎重工業(株) 木下 康裕

〃 北嶋 潤一

〃 小田 剛生

## Abstract

The ramjet engines for commercial hypersonic transports should be operated with superior economy and environmental performances. A subscale combustor was designed and fabricated to obtain fundamental emission data, especially nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) at simulated conditions of high flight Mach number. The results show that for flame temperature less than 1600K, the amount of NO<sub>x</sub> varies with the flame temperature, and that more than 1600K, not only flame temperatures but also gas pressures and oxygen concentrations affect the NO<sub>x</sub> emission.

## 1. はじめに

民間用超音速輸送機のラムジェットエンジンは優れた経済性と環境適合性を両方兼ね備える必要があり、その主構成要素であるラム燃焼器には全作動条件で安定して効率良く燃焼すると共に、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) を中心とするエミッションを低減する燃焼技術の確立が求められている。当社は通商産業省工業技術院が進める「超音速輸送機用推進システムの研究開発」(HYPR プロジェクト)において、飛行マッハ数 2.5~5 で作動するラムジェットエンジンの燃焼器の研究開発を受託し、メタンを燃料とする安定、高効率、低公害燃焼技術の確立を目標に、モデル燃焼器を用いた実験的研究を実施している。

超音速輸送機は成層圏中を長時間巡航するためエミッション、特にオゾン層を破壊する NO<sub>x</sub> が問題となる。一方燃焼の面からは、高速飛行時にはラム燃焼器の入口及び出口の温度がそれぞれ 1270 K 及び 2170 K レベルの高温になるため、従

来のターボジェットエンジンに比べ NO<sub>x</sub> の排出が著しく増加することが予想され、NO<sub>x</sub> の排出量を大幅に低減する燃焼技術の確立が不可欠である。しかしながら、ラム燃焼器が排出する NO<sub>x</sub> に関するデータは、本プロジェクト関連でいくつか報告<sup>(1)</sup> されている以外は世界的に見ても非常に少ないのが現状である。そこで今回、メタンを燃料としてサブスケールラム燃焼器を用いて燃焼試験を実施し、燃焼器の入口条件が NO<sub>x</sub> の排出特性に及ぼす影響を調べたのでその結果を報告する。

## 2. ラム燃焼器及び実験方法

### 2.1 供試ラム燃焼器

本試験に使用したラム燃焼器の概略を図 1 に示す。燃焼器は内径 155 mm の円筒型であり、内壁は耐火材にすることで燃焼ガス温度の低下を防止し、その外側に水冷ジャケットを設けて燃焼器全体の冷却を行った。本研究のラム燃焼器では大幅な低 NO<sub>x</sub> 化を図るために予混合燃焼方式を採用している。従って、燃焼器には上流側から主燃料ノズル及び保炎器が取り付けられているが、その他に着火、保炎用のパイロット燃料ノズルがガッタ内部に設けられている。主燃料ノズルと保炎器の間の混合距離は、予混合気の混合性能と高温燃焼時の自己着火防止の両面から考える必要があり、本燃焼器では 100 mm とした。また、保炎器から燃焼器出口までの燃焼領域長さは 1170 mm であり、燃焼器全体の長さは 1270 mm である。

保炎器は図 2 に示すような断面形状が三角形をした環状タイプであり、環状部の幅は 20 mm、頂角は 30 度で、そのブロッケージ比は 38% である。そして、高温燃焼試験においても変形、焼損がないように水冷構造を採用したが、冷却水は燃焼器外部に放出した。また、パイロット燃料や冷却水は、保炎器を固定する中空ストラットの中を通して保炎器に供給した。

(平成 8 年 1 月 19 日原稿受付)

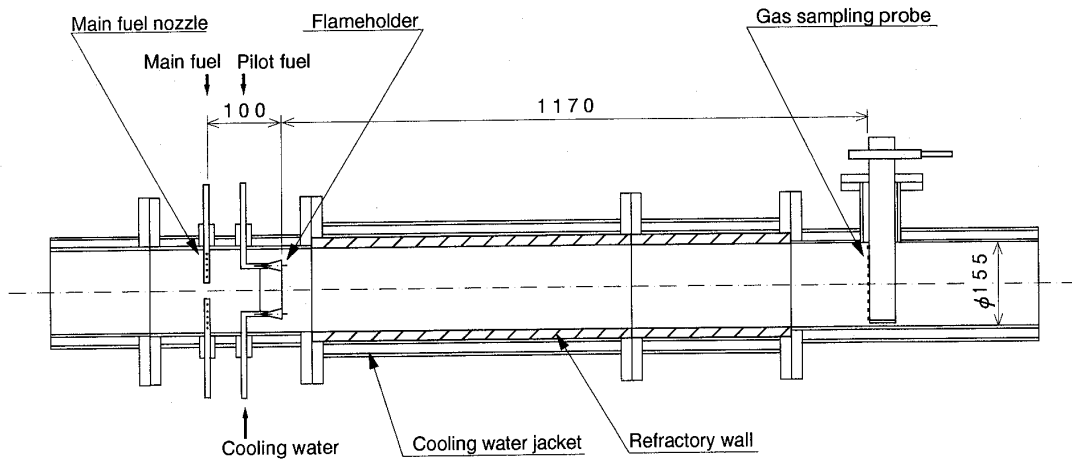


図1 供試ラム燃焼器概略

表1 ラム燃焼器作動条件

項目	飛行マッハ数3	飛行マッハ数5
燃焼器入口温度 K	600	1263
燃焼器入口圧力 kPa	145	460
燃焼器入口流速 m/s	98	40
当量比 φ	0.3	0.43

表2 燃焼試験条件

燃焼器入口温度 K	600, 700, 800, 900, 1000
燃焼器入口圧力 kPa	200, 400, 600
燃焼器入口流速 m/s	40
当量比 φ	0.3, 0.4, 0.5

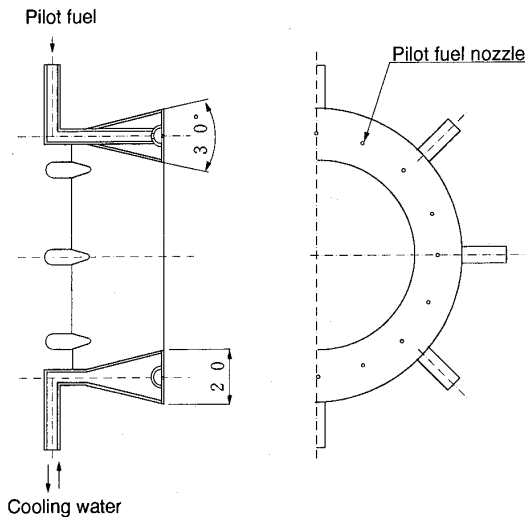


図2 保炎器概略

主燃料ノズルは、均一な予混合気を形成するように、燃料を空気の流れに直交及び平行して噴射する小孔を多数あけたインジェクタを、周上16本等間隔に取り付けた。

## 2.2 実験方法

燃焼試験は川崎重工業㈱の高圧空気源燃焼試験設備を用いて実施した。本試験設備は燃焼器入口圧力が最高1 MPa までの燃焼試験が可能であるが、ガスタービンの排熱を利用する熱交換器と800 kW の電気ヒータを併用することにより、燃焼器入口空気温度を最高1070 K 程度まで上昇させることができる。

燃焼器入口に取り付けた全圧管を用いて燃焼器入口全圧を、また5点式楕形Kタイプ熱電対を用いて燃焼器入口温度を計測した。

燃焼器からの排ガスは、燃焼器出口に取り付けた9点式水冷ガスサンプリングプローブを用いて、それぞれの小孔から独立に燃焼ガスを採取した後で集合し、連続式排ガス分析計に導いてその組成(NO<sub>x</sub>, UHC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)を分析し、その結果から燃焼効率やエミッションの排出指数を算出した。また、同プローブを利用して燃焼器出口全圧を計測し、入口全圧との差から燃焼器における全圧損失を算出した。

火炎温度は、オリフィス流量計で計測した空気と燃料の流量から算出した当量比に対する断熱火炎温度 T<sub>ad</sub> を計算し<sup>(2)</sup>、燃焼効率を考慮して次式により計算した。

$$T_f = T_6 + (T_{ad} - T_6) \cdot \eta_b \quad (式1)$$

燃料としてはメタンを約98%、その他不活性ガス

を2%程度含有する天然ガスを使用した。

表1に超音速輸送機用ラムジェットエンジンの燃焼器の作動条件を示すが、本試験においてはラム燃焼器からのNO<sub>x</sub>の排出を詳細に評価できるように、上記作動条件を含む比較的広い燃焼器入口条件(温度に関しては試験設備の能力から1000Kまでとした)でパラメトリックに変化させて燃焼試験を実施した。表2に本燃焼試験における条件を示す。

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 入口温度がNO<sub>x</sub>の排出に及ぼす影響

図3に燃焼器入口がP<sub>0</sub>=200kPaの条件において燃焼器入口温度をパラメータとした時の、当量比と燃焼効率及びNO<sub>x</sub>排出濃度の関係を示す。T<sub>0</sub>=600Kの低い入口温度条件では燃焼効率は試験を行った全当量比範囲で低い値を示すが、T<sub>0</sub>=800K, T<sub>0</sub>=1000Kと高くなると燃焼効率は最小でも $\eta_b=90\%$ を、 $\phi=0.4$ 以上では $\eta_b=99\%$ を示すようになり特に大きな問題はない。

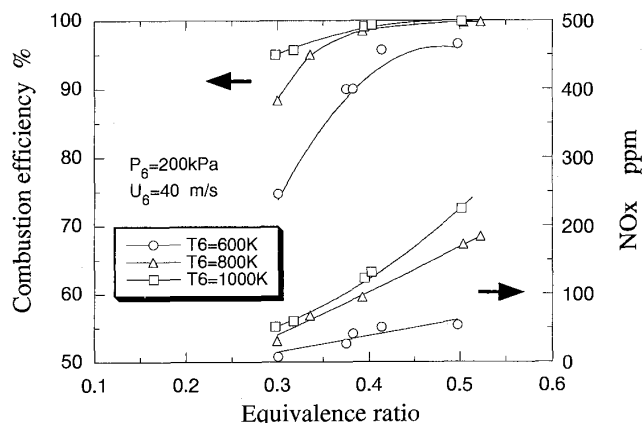


図3 当量比と燃焼効率およびNO<sub>x</sub>排出濃度の関係

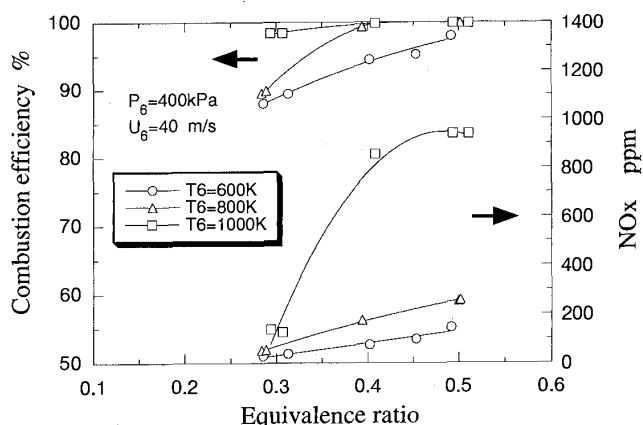


図4 当量比と燃焼効率およびNO<sub>x</sub>排出濃度の関係

一方NO<sub>x</sub>に着眼すると、燃焼効率と同様にその排出濃度は当量比の増加とともに高くなっており、また燃焼器入口温度が高いほどその排出値も大きいことがわかる。

次にP<sub>0</sub>=400kPaの場合の燃焼効率とNO<sub>x</sub>排出濃度を図4に示す。全体の傾向としてはP<sub>0</sub>=200kPaの場合と同様であるが、T<sub>0</sub>=1000Kの時のNO<sub>x</sub>の排出が他の温度条件に比べ極端に多く当量比が $\phi=0.4$ の条件では870ppm、 $\phi=0.5$ では950ppmの高い値を示している。この結果から、入口温度が高く当量比が大きい条件、即ち火炎温度が高い場合にNO<sub>x</sub>の排出量が増えるが、特に高温時に極端に増加することがわかった。

#### 3.2 火炎温度、酸素濃度とNO<sub>x</sub>の排出量の関係

次に火炎温度とNO<sub>x</sub>排出の関係について考察する。今回の試験では、燃焼ガスを多点採取した後で集合して組成分析したため、ここで示すNO<sub>x</sub>の排出値と火炎温度は平均値として表される。ところが、実際には燃焼器出口においてそれぞれ分布が存在し、単純に平均値で両者を相関づけられないものと考えられる。しかし、以前実施した混合計測試験の結果から、本タイプの燃焼ノズルは比較的均一な混合気を形成することが確認されているため、両者を平均値で評価してもある程度信頼のある相関が得られるものと考えられる。

図5は燃焼器入口圧力がP<sub>0</sub>=400kPaの場合の火炎温度とNO<sub>x</sub>の排出濃度を表している。火炎温度がT<sub>f</sub><1600Kの条件では、NO<sub>x</sub>の排出値は燃焼器入口温度によらずほぼ火炎温度に対して指数的に変化していることがわかる。しかし、火炎温度がT<sub>f</sub>>1600Kになると燃焼器入口温度の影響が顕著に表れ、T<sub>0</sub>=800K以下の入口温度時にはT<sub>f</sub><1600Kで得られる関係の延長上にあるものの、T<sub>0</sub>=900K以上の入口温度時にはNO<sub>x</sub>の排出は急激に増加し、火炎温度とNO<sub>x</sub>排出濃度の相関の傾きは大きくなっている。

この原因としては、試験条件が異なることによる予混合状態の変化のような物理的な要因も考えられるが、ここでは燃焼ガス中の残存酸素濃度という化学的な要因に着目した。燃焼器入口温度が高い条件におけるラム燃焼は、鈴木らが報告しているように早い時期に炭化水素系の反応が終了し、その後でNO<sub>x</sub>の反応がゆっくりと進む<sup>(3)</sup>ものと

考えられる。この場合  $\text{NO}_x$  の反応に影響を及ぼすものとしては火炎温度と酸素濃度が考えられるため、燃焼ガス中の残存酸素濃度と  $\text{NO}_x$  の排出を関連づけた。図6に火炎温度をパラメータとした時の、ガスサンプリングで得られた燃焼ガス中の酸素濃度と  $\text{NO}_x$  の排出濃度の関係を示す。今回は火炎温度一定の条件で試験を行っていないため、図6の火炎温度には  $\pm 20 \text{ K}$  程度のばらつきがある。火炎温度が低い  $T_f = 1530 \text{ K}$ ,  $1630 \text{ K}$  の時には、 $\text{NO}_x$  濃度は残存酸素濃度の変化によらずほぼ一定値を示し、火炎温度が  $\text{NO}_x$  の排出値を決定している。しかし、 $T_f = 1770 \text{ K}$ ,  $1840 \text{ K}$  と高くなると、酸素濃度の増加により  $\text{NO}_x$  の排出値は大幅に増加しており、酸素濃度が11%から13%に増加した場合  $T_f = 1770 \text{ K}$  の時には2倍程度、 $T_f = 1840 \text{ K}$  の時には4倍程度  $\text{NO}_x$  濃度が増加している。このように、火炎温度の違いにより残存酸素濃度の  $\text{NO}_x$  の排出に及ぼす影響が大きく異なる結果が得られたが、このことは高速飛行

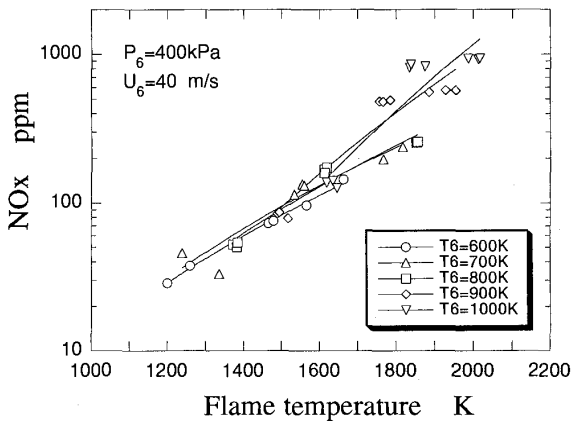


図5 火炎温度と  $\text{NO}_x$  排出濃度の関係

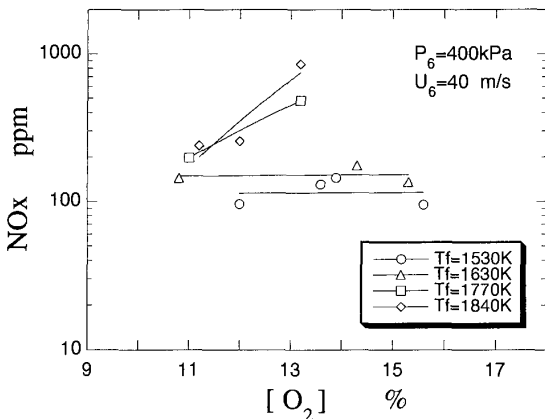


図6 燃焼ガス中の酸素濃度と  $\text{NO}_x$  排出濃度の関係

時のラム燃焼器のように、燃焼器出口のみならず入口温度も非常に高い条件で燃焼を行わせるものでは、 $\text{NO}_x$  の発生量は従来の亜音速機に比べ大幅に増加することを示している。

### 3.3 入口圧力が $\text{NO}_x$ の排出に及ぼす影響

燃焼器入口温度が  $T_6 = 600 \text{ K}$  の条件において入口圧力をパラメータとした時の、当量比と燃焼効率および  $\text{NO}_x$  の排出濃度の関係を図7に示す。燃焼器入口圧力が低く、当量比が小さい条件において燃焼効率は低い値を示すが、それ以外は燃焼器入口圧力が燃焼効率に及ぼす影響は小さい。一方  $\text{NO}_x$  は、入口圧力の増加に伴ってその排出値は単調に増えていることがわかる。

次に  $T_6 = 1000 \text{ K}$  の場合の燃焼効率と  $\text{NO}_x$  排出濃度を図8に示す。燃焼効率は一部の条件を除きほぼ99%の高い値を示している。 $\text{NO}_x$  に関しては、 $T_6 = 600 \text{ K}$  の結果と異なり、入口圧力が  $P_6 = 400 \text{ kPa}$ ,  $P_6 = 600 \text{ kPa}$  の高い条件においては、火炎温度の上昇とともにその排出濃度は非常に高

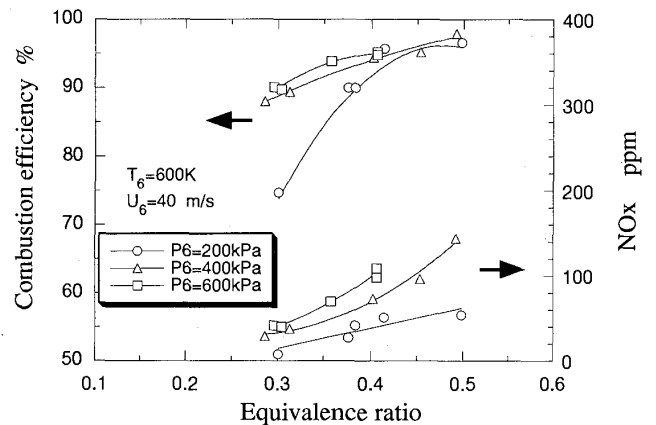


図7 当量比と燃焼効率および  $\text{NO}_x$  排出濃度の関係

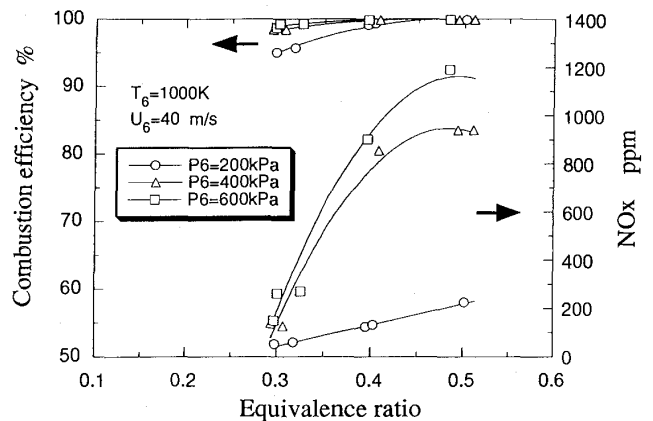


図8 当量比と燃焼効率および  $\text{NO}_x$  排出濃度の関係

い値を示すことがわかる。

燃焼器入口圧力が NOx の排出に及ぼす影響についてはターボジェット燃焼器を対象としてこれまでに多くの報告<sup>(4),(5)</sup>があるが、燃焼器の形態、試験条件等でかなり結果が異なっている。そこで、今回の試験結果を圧力の対数で表わしたのが図9である。この図からわかるように今回の結果は、圧力に対し指数的に NOx の排出値は変化するが、その乗数としては試験条件により  $n=0.5\sim 2.9$  とかなりのばらつきがあることを表している。

すべての試験結果を火炎温度でまとめたのが図10である。火炎温度が  $T_f < 1600\text{ K}$  の低い条件においては、試験条件により若干ばらつきがあるものの NOx の排出値は火炎温度で整理することができるが、 $T_f > 1600\text{ K}$  の範囲では前節で示したように入口温度(酸素濃度)や入口圧力により NOx 値は大きく異なっている。図には  $T_6 = 1000\text{ K}$  試験時の入口圧力および当量比条件を明記しているが、NOx の排出値が圧力や当量比に大きく影響

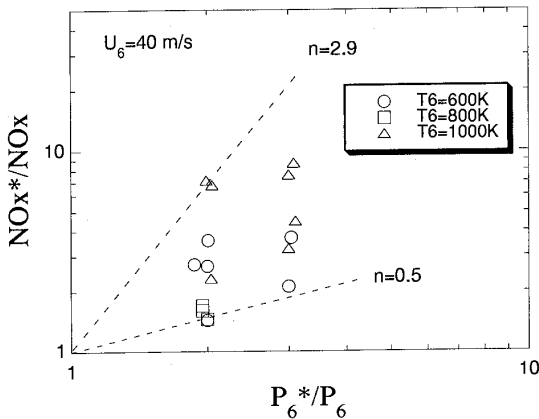


図9 燃焼器入口圧力と NOx 排出濃度の関係

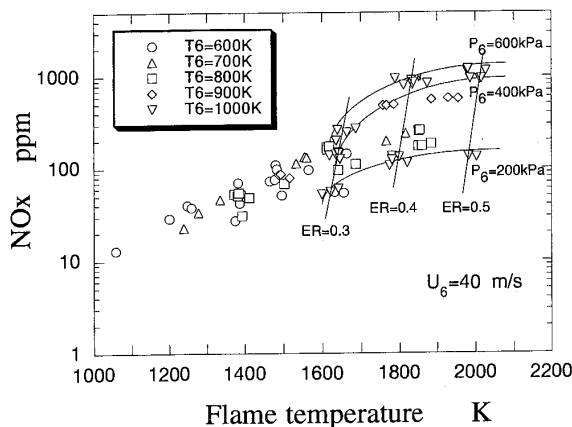


図10 火炎温度と NOx 排出濃度の関係

され、単に火炎温度だけで整理できないことがわかる。

#### 4. まとめ

メタンを燃料とするサブスケールラム燃焼器を用いて、燃焼器の入口条件(温度, 圧力, 当量比)を変化させて NOx の排出に及ぼす影響を調べた。その結果以下のことが明らかとなった。

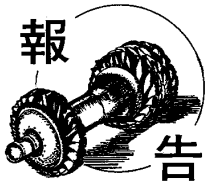
- (1) 火炎温度が  $T_f < 1600\text{ K}$  の条件では NOx の排出量は燃焼器入口温度によらずほぼ火炎温度に対して指数的に変化するが、火炎温度が  $T_f > 1600\text{ K}$  になると燃焼器入口温度の影響が顕著に表れ、入口温度の上昇とともに NOx の排出は急激に増加する。この一因として残存酸素濃度の影響が大きいものと考えられる。
- (2) 燃焼器入口圧力の変化に対し NOx の排出値は指数的に変化するが、その乗数としては試験条件により  $n=0.5\sim 2.9$  とかなりのばらつきがある。特に火炎温度が高い条件ほど乗数も大きくなる。

今回の試験の結果から、ラムジェット燃焼器のような高温燃焼を行わせるものにおいては、従来のターボジェット燃焼器に比べ NOx の排出が大幅に増加し、その低減は非常に困難となることが予想される。しかしながら、NOx は超音速輸送機自体の存在をも左右するものであり、本研究においては今後も NOx の排出に関する基礎的なデータの取得や低 NOx 化に引き続き注力していく所存である。

最後に、本研究は通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度による「超音速輸送機用推進システムの研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて実施したものである。ここに関係各位に深く感謝致します。

#### 参考文献

- (1) 鈴木ほか: ガスタービン秋季講演会(盛岡)講演論文集, 1993, p. 9
- (2) 水谷: 燃焼工学, 1977, p. 207
- (3) 鈴木ほか: 第34回航空原動機・宇宙推進講演会講演集, 1994, p. 188
- (4) Neidzwiecki, R. W., et al, NASA TMX-68247, 1973
- (5) Leonard, G., et al, Transaction of the ASME, Vol. 116, July 1994, p. 542



## 1995年国際ガスタービン会議 横浜大会を終えて

組織委員長 高田 浩之

1995年国際ガスタービン会議横浜大会は10月22日から27日までの間、パシフィコ横浜の会議センターにおいて開催され、成功裡に終了した。この国際会議は1971年に第1回の会議が開かれて以来、1977年、1983年、1987年、1991年を経て、日本における第6回目のガスタービン国際会議として開催されたものであり、日本ガスタービン学会の主催のもと、Collaborating Societiesとして、Associazione Termotecnica Italiana  
Societe Francaise des Mecaniciens  
Societe Francaise 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

の8学会の共催を得て行われた。会議の実施のためには、ガスタービン学会内での前段階の準備を経たのち、1994年5月に組織委員会が、大学、研究所、メーカー、ユーザーなどの研究者、技術者、代表者を集めて発足し、その後の本格的な準備作業は組織委員会の内部に設けられた実行委員会によって行われた。この機会に、共催を頂いた前記の各学会および会議の企画・参加登録などの面で御協力下さった組織委員の方々、会議の準備・実施のために御努力を頂いた実行委員の方々に厚く御礼申し上げたい。

会議の開催状況は次項以下に実行委員会から詳細に報告されることになっているが、いずれにしても会議の参加者数、発表された論文数ともに前回までに比べて僅かながら増加しており、展示会も盛会であり、また当初心配された財政面の困難も見事に克服されて、会議が成功を収めたことは

誠に喜ばしいことである。関係者の絶大な御努力に改めて感謝の意を表したい。

ふり返ってみると、わが国で開催されて来た20数年にわたるこの一連のガスタービン国際会議は、一面ではわがガスタービン学会の歴史そのものであり、同時にまた、その会議が毎回成功を収めて来たことは、即ちわが国におけるガスタービンの著しい発展と深い関連があることでもあり、誠に御同慶にたえない。

今後このガスタービン国際会議がますます発展し継続されていくことを望みたい。これに対する最大の問題点は、多分、如何にして海外から多数の参加者と良質の論文発表を得るかという点であろう。もちろん、そのためにはこの国際会議をすべての人が参加したいと思うような、すべての人がそれに値すると思うような質的レベルの会議に保つことが本質的に重要であるとはいうものの、現実には、わが国がやはり欧米からは遠い地にあること、過去毎回の会議時を通じて円高が継続的に進んで来ていること、一部の経済的に困難な国には論文を提出できても実際に来日することが困難な人が多いこと、さらには最近では世界各地で催される国際会議の数が非常に増加して来ていることなどを考えると、これは容易なことではなからう。

組織委員会では今回、海外の大学、研究所、企業などの人で従来から本国際会議に関連の深い方々にお願いして Advisory Committee を設け、御出席頂いたメンバーの方に今後の国際会議の企画や運営に関して参考となる意見を求めることを行った。これに関してもあとの記事で報告があることであろうが、今後はガスタービン学会でご検討頂いて、もっと常設的な手段で海外の研究者、技術者との接触の密度を高め、有効な助言も得て、本国際会議発展の一助とする方策を探られんことをお願いしたい。

(平成8年1月16日原稿受付)



# 1995年国際ガスタービン会議報告

## 全 般

実行委員会委員長 有賀 一郎

### 1. はじめに

我が国における6回目の国際ガスタービン会議が、横浜大会として昨年10月23日より27日までの5日間開催された。この期間、初めの4日間は研究発表講演会で、最終27日にPlant Tourが行われ、いずれも盛会裡に終了した。

### 2. 準備段階について

1991年の前回国際会議において当時の高田浩之実行委員長より次は1995年に開催することが予告された。以後、これにそって、まず日本ガスタービン学会内に次期国際会議検討委員会が1993年3月に設けられ、開催時期、場所(会場)の選定、および協力学会、会議内容・規模などについての予備的審議から始められた。開催年については、上述のようにすでに1995年という線が打ち出されていたが、委員会発足当初、折からの我が国の経済環境の悪化や円高による海外参加者の減少、また先行きの見通しが定かでないなどの理由から会議開催が予定通り進められるか否か論議が重ねられた。しかし、この時の経済状況、円高基調が近い将来好転する確証が得られず、もしそうであれば従来のローテーションをくずすことなく開催するのがよいということで準備を始めることとなり、それに従うタイムスケジュールの検討が行われた。なお、今回の開催時期がその直前に我が国で開かれる世界エネルギー会議と接近し、その干渉効果がマイナス要因にならないかと懸念する声も一部にあった。しかし、包括的にエネルギー問題を取上げる同会議とは性格上に違いがあり、両立するのではないかと判断に立って、前回とほぼ同一日程で10月下旬に開催することが学会理事会で諒承された。協力学会については、国内外の関係学会に協力要請を行い、前回通り、国内からは日本ガスタービン学会を幹事学会とし、日本機械学会、国外からは Associazione Ter-

motechnica Italiana, Société Française des Mécaniciens, Société Française des Termiciens, The Chinese Society for Engineering Thermodynamics, The Institution of Mechanical Engineers, Verein Deutscher Ingenieure の6団体の承諾を得、新たに The Korean Society of Mechanical Engineers が参加した。ただ、前回の The Institution of Engineers, Australia は参加の意思表示が無く、結局不参加となった。

会場については、まず全国を対象として考えたが、会議の準備・運営体制からやはり京浜周辺ということに落ち着いた。さらにこの地区でも展示会場を兼ね備えた会議場で、交通アクセス状況を考えると、前回の横浜会議センター(パシフィコ横浜)を再利用するのが、実務上最も合理的であるとの見解で一致した。

会議規模については、一応参加者500名、研究発表件数120~130件程度とし、これもほぼ前回通りを考えることとした。一方、展示会は本会議とは不可分であり、開催することになったが、前述の経済状況下で企業側に協力を仰いでも、どの程度の規模を考えるのが妥当であるか不透明の部分があり、この時点での見通しは楽観できない情勢であった。

会議開催にとり重要課題である予算案についても、まず前回規模をもとに検討を開始した。また、事務的作業を円滑に進めるため、事務的業務はやはり専門業者に依頼する必要性が認められ、前回の(株)コンベックス(会議)、(株)フジヤ(展示)の2社を予定することにした。

以上の準備をさらに具体化するため、1993年7月に検討委員会を1995年国際ガスタービン会議準備委員会に改組した。委員長の下に総務、論文、行事、展示、財務の5部門を設け、全体の調整を担当する幹事をおいた。委員としては大学・研究機関、企業などから28名の方にお問い合わせし発足した。各実務としては、総務で Announcement, 1st

(平成8年2月6日原稿受付)

Circularの原案作成，発行，発送先名簿の整理，事業計画案，予定会場側との折衝，事務局業者との契約内容，関連団体への協賛依頼，さらに組織委員会設立の準備など多方面にわたり担当した。論文では前回会議を参考に日程調整を図り，スケジュールを作成し，論文投稿案内，申込書の作成，発送を行うとともに，Special Lectures, Panel Discussion, Organized Sessionsの講演者，パネリスト，テーマなどについても検討を進めた。

行事関係では，Plant Tourのコース，見学先の検討，Banquetの内容，会場などの候補の検討を行った。

展示関係では，前回なみの規模にするには相当努力する必要がある，企業へのアンケートなどを参考に種々対策が講じられた。その結果，徐々に企業側からの明るい感触が得られるようになった。

予算関係については，収入面から楽観できない状況で上記各部門の支出はなるべく緊縮にすることに留意し，予算作成に取り組んだ。例えば，総務関係では事務的業務についても委託業務の内容を整理し，経費の低減化を図り，期間中の事務局スタッフを効率的に運用し，人件費の削減を検討した。しかし一方，会場借用料については前回と異なり，規定料金通りの出費による支出増の面もあったが，これも会場の使用方法，時間などを工夫し，支出増をなるべく抑える努力をした。また，論文関係は前回通りの規模としたが，Briefingの中止など経費の削減に努めた。展示についてはできるだけ多くの出展社を勧誘し，収入面の補強を図ることにした。このように各部門において，準備，実施状況を想定しながら，合理的予算編成を心掛けた。

収入面に関しては，前回同様，日本ガスタービン学会を通じ，特別賛助会費を同会賛助会員にお願いして頂いた。厳しい経済状態の下ではあったが，日本ガスタービン学会ならびに実行委員会財務委員の働き掛けにより，目標額に近い学会負担金を日本ガスタービン学会特別賛助会費として受け入れることが出来た。

以上のような経過で，事業計画案が固まり，予算案が編成されたので，1994年6月に1995年国際ガスタービン会議横浜大会組織委員会が設けられ，その第1回組織委員会が早稲田大学総合研究

センターで開かれた。組織委員長として高田浩之教授（東海大）が承認され，同議長の下で準備委員会で立案された事業計画案，予算案が諮られ，可決された。

事業計画については，共催・協力学会，会期，会場，参加予定者数，研究発表予定数，予定セッションテーマ，使用言語，論文関係日程，印刷物，行事，展示会などにつき説明が行われた。また，予算については，予算規模7,610万円で収入，支出の内訳について説明された。

次いで実行委員会の設置が提案され，承認された。その構成は有賀一郎実行委員長（当時慶応大，現千葉工大）以下41名の委員からなる。

実行委員会の発足とともに準備委員会でのこれまでの準備作業がそのまま引継がれ，各部門での準備も本格化し，それぞれ最終段階へと入っていった。

まず，2nd, 3rd Circularについては，各部門から提出された案の内容を総務委員会で整理し，編集，作成したものを関係先に配布した。参加登録者はほぼ前回なみとしたが，特に海外参加者にはCredit Cardの利用を認めるなど便宜をはかった。また，学生のために新たに登録費を設定するなど細部を改めた。一方，収入面を潤すため，種々の補助金の申請を行ったが，結果として横浜市からの補助金（50万円）が受けられることになった。

準備および会議期間中の運営には実行委員が当たることとしたが，細部の実務をバックアップするため各部門に小委員会（Sub-Committee）を設けてこれに対処した。

論文関係では，論文概要の査読結果をもとに採否決定を行い，さらに提出論文の整理，およびProceedings作成の作業を進めた。並行してOrganized Sessionのテーマの調整を行った。

行事関係もそれぞれの内容を固めていったが，参加しやすい形にすることで工夫し，参加人員の予測ではいろいろ苦心した。とくに期間中に行われるBanquetはHotel New Grandを会場とし，内容，費用の点で関係委員が尽力した。また，One-Day Plant Tourも京浜地区の東京電力横浜火力発電所，富士電気ガスタービン研究所と，筑波地区の工業技術院機械技術研究所，日本自動車研究

所の2コースを準備し、貸切バスの利用で効率の良い見学方法を検討していった。Accompanying Persons' Program は会議関係者のご夫人達に労を煩わし、バスをチャーターして箱根への Excursion が企画された。

展示関係では、企業の協力が得られ、予期以上の出展社、および小間数が決まり、前回は上回るものとなった。最終的には37社、140小間となった。この段階の作業過程としては、小間の配置の検討、出展企業への説明会が行われた。なお、展示会への入場者については会議登録者以外の一般入場者に対する登録を行うことにしたが、後に入場者の概数を知る上で有効であった。また、会議および展示会を広く周知して貰うためにポスターを作成し、企業、学校・研究機関などに配布した。さらにPRの一環とし、電気新聞に見開き2ページを使って特集の形で関連記事を掲載して貰うなどの広報活動を行った。

準備委員会の段階で設置を決めた International Advisory Committee については、その後、実行委員会で外国委員の選定を行い、11名の方に委嘱することとした。また、会期中に同委員会を開くことを決めた。

財務面では、上記展示関係の状況が好転したが、参加登録者の目標数達成などに不透明の点があった。さらに日本ガスタービン学会への特別賛助会費協力については、各方面への働きかけを関係者を通じて行い、徐々にその効果が現れ始め目標額に近付いたが、当初予定額を達成するのは難しそうな状況であった。同時に他の諸準備が進み、収入、支出面での再検討を行った結果、当初の予算案を修正する必要があることが判り、組織委員会にこれを諮ることになった。

10月6日、横浜会議センターにおいて第2回組織委員会が開かれ、International Advisory Committee の設置および予算修正の件が認められ、約8750万円の規模になった。

### 3. 会議実施期間中について

会議が近付き、10月21日に同会議センターの一室で会議運営に協力する学生アルバイトへの説明会を開き、さらに登録時に渡す Proceedings, Program など関連資料の袋詰め作業を行った。

会議前日の22日16時より会議センター2階の

登録カウンターが開かれ、登録業務が開始された。それに先立ち、各講演会場、各種看板などのチェック、使用機器の点検、また事務局開設、諸事務機器の搬入など実務的作業も順調に進められた。

同日18時より、会議センター3階の Lounge で Welcome Reception が開かれた。坂田委員の司会で進められ、有賀実行委員長より開会の挨拶があり、引続き、濱田副組織委員長に外国からの参加者数名も加わり、共同作業で酒樽の鏡割が披露された。高田組織委員長の音頭で一同乾杯の後、遠来の海外参加者を交え、和やかな懇談が続けられた。参加者は120名程度であったが、横浜の夜景を楽しみながら夕べのひとときを過ごした。



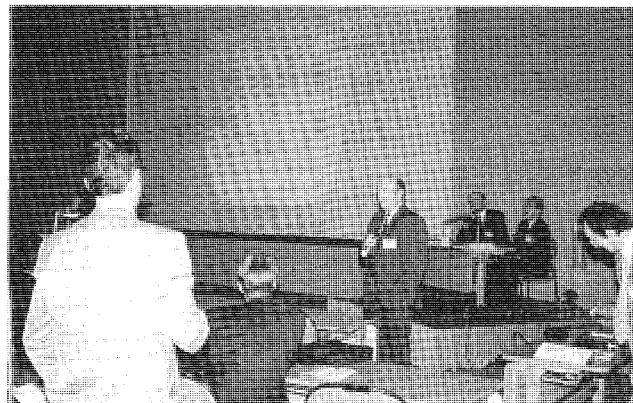
Welcome Reception での“鏡割”

さて、翌23日9時50分より会議センター5階の小ホールにおいて今回の国際会議の幕が開けられた。冒頭、高田組織委員長により Opening Address があり、引続き欧・米・口の3名の講師による Special Lectures が行われた。以後26日までの4日間にわたり、研究発表講演が Technical Sessions, Organized Sessions, Panel Discussion の形式で行われ、活発な討論が交わされたが、これらについては論文関係報告にまとめてある。

10月25日19時より Hotel New Grand で Banquet が開催された。場所が山下公園前で、会議会場よりそれほど離れていなかったが、海上バスを利用する人もいて、定刻前には会場に多くの人々が参集した。横浜でも由緒あるホテルだけに、宴会場もゆったりとした落ち着いた雰囲気に加え、小編成の弦楽合奏も彩りを添えた。会は秋山、橋



高田組織委員長による Opening Address



Technical Session における討論風景

本両氏の司会で進められ、高田組織委員長の歓迎の挨拶で始まり、日本ガスタービン学会葉山会長、および日本機械学会棚沢副会長の各挨拶に引続き、田中監事（前組織委員長）の音頭で乾杯し、会議の成功を祝った。会場には8名程度ずつの円卓が設けられ、それぞれの席で話はずんだ。宴も進み、海外協力学会関係者の Prof. Rautenberg, Prof. Yang, Prof. Gallus らのスピーチがあり、この会議への期待が述べられたが、特に、Mrs. Avran の気さくなスピーチで一層その場が和んだ。秋葉行事委員長の Closing Address で終宴となったが、格調高い Banquet として好評であった。

International Advisory Committee (略称 IAC) 会議の国際化を推進するために、影響力のある海外の研究者を加えた委員会を設けることは、過去の国際会議実行委員会でも話題になっていた。今回、準備委員会、実行委員会ならびに総務で検討を重ねた結果、本国際会議に積極的な参加経験



Banquet の楽しいひととき

のある海外の Key Person に委員を委嘱して、国際会議実行委員会所属の形で標記委員会を試行的に発足させることとなった。実行委員会総務担当の大田英輔委員が中心となり準備をすすめ、論文委員会と相談して、過去の出席者、今回の出席期待者から下記の11名を委員に推薦し、実行委員会で委員委嘱の承認を得た。

Prof. G. E. Andrew (UK), Mr. P. Avran (France), Prof. F. A. Breugelmans (Belgium), Prof. Cai Ruixian (P. R. C), Prof. H. E. Gallus (Germany), Prof. M. Kurosaka (USA), Prof. E. Macchi (Italy), Prof. M. Rautenberg (Germany), Prof. V. Sosounov (Russia), Mr. D. M. Todd (USA), Prof. O. Y. Yang (Korea).

IAC 委員会は会議期間中の10月26日(木)パシフィコ横浜の会議室で、Avran, Breugelmans, Todd および Yang 各委員出席の下に、組織委員長、同副委員長、実行委員長、幹事、各部門担当委員長、および監事、実行委員会顧問が参加して大田委員の進行で開催された。国際会議参加にもかかわらず Prof. Gallus は急病で、Prof. Rautenberg は帰国のため欠席となり、少ない出席数ではあったが、約1時間半にわたり、熱心且つ詳細な現状分析の意見と国際的活性化のための積極的提言が各委員からなされた。本国際会議の内容については概ね高く評価されていたが、同時期に開催される他会議との競合を避けるために会議予告と案内が各国内で事前に十分に行き渡るように配慮すること、Proceedings の領布や英文ジャーナル掲載を積極的にし若手研究者の会議に対する評価

を高めること、国情による参加取り消しへの対策、カラー資料の利用法等々、広範囲にわたる内容を含んでいた。各委員からの協力意向もあり、次回国際会議への準備と共に、学会の国際化推進をも配慮し、同 Committee については本国際会議の終了後も何等かの形で存続できないか学会、実行委員会間で検討中である。

同日、Panel Discussion 終了後、実行委員長より Closing Address があり、次回を 1999 年に開催したいとの予告があつて閉会した。

本会議への登録者は表に示すとおりであった。

	国内	国外	合計
一般登録	452名	65名	517名
特別登録*	77名		77名
同伴者登録	12名	7名	19名
招待	2名	6名	8名
	543名	78名	621名

\*特別賛助会費による登録

一方、展示会は会議場に隣接する展示ホールで開かれ、各社よりガスタービン本体、関連機器などが多数出展された。前回に比べ、ガスタービンメーカの展示ブースが大形化し、さらに展示場のアレンジにも工夫をこらすなど見栄えのするものとなった。参加者も 3700 名(延べ人数)で前回は上回った。また、この展示が本会議の財政面に大きく寄与してくれた。

本国際会議の会期最終日である 27 日には One-Day Plant Tour が 2 Course に分かれ、予定通り



ガスタービン展示会

に行われた。

Course 1 には 38 名(内 8 名が外国人)の参加者があつた。まず、富士電機ガスタービン研究所を訪問し、吉川社長はじめ、関係者より同所の概要説明を受けた後、シーメンス社製 V 64-3 型ガスタービンの見学を行い、無負荷運転ながら運転状況を見ることができた。その後、東京電力横浜火力発電所に向かい、同所を見学した。まず、星所長ほか関係者より、同所の概要説明があり、引き続き、現在建設中の ACC 発電設備の見学を行った。環境対策を施した最新設備であり、参加者にとっても貴重な経験であつたかと思われる。

一方、Course 2 には 19 名(内 14 名が外国人)が参加し、筑波地区を訪問した。まず、工業技術院機械技術研究所を訪れ、松野所長はじめ関係者より同所の紹介があつた。所内見学では、プラズマ溶射、FOD (Foreign Object Damage)、翼列試験、水素 WE-NET 関連の諸設備と、基礎および先端両面の研究活動に接することができた。その後、日本自動車研究所にまわり、森本理事の挨拶があつた後、同所の見学が行われ、100 kW エンジン、熱交換器、燃焼器の試験リグなどセラミックガスタービン関連の設備・機器などが一行の関心を集めた。

これら 2 Course 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厚くお礼を申上げる。

この他、Accompanying Persons' Program として 10 月 24 日朝 9 時より夕方までバスによる箱根への Excursion が挙行された。参加者 18 名(内 10 名が外国人)で、曇り勝ちの日和ながら芦ノ湖遊覧を含め、初秋の風景を直かに見物して頂いた。

行事に関しては、当初の企画が何れも予定通りに無事実施されたが、各担当者の尽力に負うところが多かった。

#### 4. おわりに

以上、本大会開催に関わる概略を述べてきたが、6 回目を終えて我が国での国際ガスタービン会議も確かに定着してきた、というのが実感である。そして今回も予定を上回る参加者があつたことはガスタービンに対するニーズが世界的に高まり、それがエネルギー供給の上で不可欠な動力源として広く認識されてきたことを裏付けるもので、極めて喜ばしい限りである。ただ、前

回もあったが、海外からの参加者の中で国情により、外交手続き上や経済的理由から来日不能のケースも少なからずあり、その対策は今後の課題として残された。

一方、この会議の準備、運営を担当し、率直に抱いた印象は、会議自体に一つの定形ができてしまったことである。従って、未知の問題は次第に少なくなり、従来の経験をそのまま利用できる点では確かに準備・運営にたずさわる側からはやり易く、落ちも少なく、有り難いことには違いないが、他方、充足感の上で今一つ物足りない気がしたのも事実である。それでも今回は厳しい財務条件のもとで実行委員会の各部門でいろいろ工夫し、その成果がみられたし、さらに Advisory Committee を設け、海外委員から直接提言を聴くなど新しい試みを導入した点は評価されるべきであろう。

21世紀に向け、科学技術の進展は絶えることなく続くとともに、その情報はインターネットなどの新しい手段を通じ、全世界をリアルタイムで伝達可能な時代となりつつある。この様な技術の先端化と情報化が支配的となる新しい世紀に直面し、このガスタービンの国際会議もその独自の存立意義を明確にすべき時期を迎えようとしている気がしてならない。来るべき1999年の国際会議にこれらの点を踏まえた新しい構想が少しでも取入れられることを期待するものである。

終わりに、この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、展示会への出展社の方々、また、会議の実施にご指導、ご協力頂いた組織委員ならびにご多忙中終始ご尽力賜った実行委員会、小委員会の皆様に心よりお礼を申上げる。

## 1995年国際ガスタービン会議横浜大会 実行委員会委員構成

委員長	有賀一郎 (千葉工大)
幹事	川口 修 (慶大理工)
総務委員会	酒井俊道 (東理大工), 飯田義亮 (東芝), 藤川泰雄 (日産自), 大田英輔 (早大理工), 吉識晴夫 (東大生研)
財務委員会	永井康男 (三菱重工), 伊藤文夫 (東京電力)
論文委員会	永野三郎 (東大教養), 梶昭次郎 (東大工), 山根隆一郎 (東工大工), 荒川忠一 (東大工), 荒木達雄 (武蔵工大), 水谷幸夫 (阪大工), 三宅 裕 (阪大工), 大宮司久明 (東北大工), 井上雅弘 (九州大工), 田丸 卓 (航技研), 村上 哲 (航技研), 菅 進 (船舶技研), 永野 進 (IHI), 山本 肇 (川崎重工), 佐々木正史 (日産自)
行事委員会	秋葉雅史 (横国大工), 蓑田光弘 (元航技研), 吉識晴夫 (東大生研), 佐藤幹夫 (電中研), 住江 新 (自動車研), 植草久雄 (荏原製作所)
展示委員会	和田正倫 (日電工), 藤網義行 (IHI), 岩井益美 (トヨタ), 岡本雅昭 (川崎重工), 岡本洋三 (東京ガス), 白上広昭 (三井造船), 長妻 宏 (東芝), 伊藤高根 (東海大工), 濱純 (機械技研), 木下史郎 (神戸製鋼), 末永明司 (三菱重工)
実行委員会小委員会	
総務小委員会	太田 有 (早大理工), 小尾晋之介 (慶大理工), 田中泰久 (東芝), 中嶋照幸 (日産自), 藤本一郎 (拓殖大工),
行事小委員会	秋山算甫 (IHI), 熱田正房 (日立), 飯尾雅俊 (日産自), 坂田公夫 (航技研), 田中泰久 (東芝), 橋本啓介 (川崎重工), 古谷博秀 (機械技研), 岸根 崇 (三菱重工)

# 1995年国際ガスタービン会議報告

## 論文関係

論文委員長 永野三郎

### 1. はじめに

1995年国際ガスタービン会議横浜大会における Technical Program は10月23日より26日までの4日間、横浜市の「パシフィコ横浜」において実施された。講演発表の総数は特別講演3件を含めて132件であり、その内訳は国内86件、国外は11ヵ国より47件であった。国外からの発表はドイツの16件を筆頭に、アメリカ12件、イタリア5件、イギリス、中国が各3件、スイス、フランスが各2件、旧ソ連、韓国、スエーデン、インドネシアがそれぞれ1件であった。なお、中国からは11編、旧ソ連からは5編、サウジアラビア、エジプト、インドからも各1編の論文が Proceedings に収録されているが、発表は上記のとおりであった。これを前々回1987年東京大会における発表総数130件、うち国外14ヵ国より56件、前回1991横浜大会における発表総数122件、うち国外11ヵ国より50件と比較すると、規模としてはほぼ同じであるが、国外からの発表件数が漸減傾向にあることが判る。前回に比べて、ドイツからの参加は漸増している一方で、アメリカおよびイギリスからの参加が減少していること、前々回に比べて中国および旧ソ連を合わせて12件の発表キャンセルがあったことなどが減少傾向に影響している。一般的に言って物価高である上に円高の頂点にあったことが海外からの参加を困難にしていたことは否めないであろう。しかし、中国および旧ソ連からの投稿者の中には、来日の意志があつて手続きを始めていたにも拘らず入国査証が間に合わず直前になって講演発表を断念した人達も多い。全世界を対象として論文募集を行い、なおかつ発表キャンセルが多発しないようにするには、何等かの対策が今後は必要であろう。

### 2. 準備段階

テクニカルプログラムの準備は論文委員会を中

心にして進められた。当初の論文委員会は葉山現会長を委員長として発足し、93年秋から94年春にかけての3回の委員会で、1st Circularの発行に向けて、論文発表の規模、予算、セッション構成、日程等についての基本方針が定められた。論文発表は、このところほぼ定着した感のある方式、すなわち4室平行して4日間にわたり行うこととし、論文概要の募集および採否決定・本論文締切などの日程は以下のように定められた。なお、今回からは、従来行われていた論文申込のプロセスを省略することとした。

- |                |           |
|----------------|-----------|
| (1) 論文予備申込締切   | 94年 6月30日 |
| (2) 論文概要締切     | 94年11月30日 |
| (3) 論文概要採否決定通知 | 95年 2月15日 |
| (4) 本論文締切      | 95年 6月30日 |
| (5) プログラム編成完了  | 95年 7月15日 |

94年5月からは、筆者が論文委員会のお世話をさせていただき、論文予備申込受付以降の実務を委員会で処理していくこととなった。なお、その際、航技研の村上哲氏に加わっていただき、幹事役をお願いすることとした。

論文の募集に当たっては、厳しい円高傾向の中、海外からの論文申込の激減が懸念されたが、幸いそれは杞憂に終わり、始めに述べたようにほぼ従前どおりの規模の応募があった。これら応募論文の状況を勘案しつつ、論文委員会では94年9月頃から特別講演、オーガナイズドセッション(以下OSと略記)、パネルディスカッション(以下PDと略記)およびテクニカルセッション(以下TSと略記)それぞれの企画に関する検討を開始した。

特別講演に関しては、日本、米国、欧州から各1件の3件とし、そのうちの少なくとも1件はアカデミックな内容のものとする事とし、慎重に人選を進めた。高田組織委員長ともご相談しつつ、具体化に際しては航技研の能瀬氏および荒木委員

(平成8年2月6日原稿受付)

のご協力を得た (3 項参照)。

論文の応募状況としては、国内からセラミックガスタービン (以下 CGT と略記) の開発成果に関する論文が多く寄せられたこともあって前回よりかなり多く、特別講演や OS, PD 用の要請論文まで含めると 99 編の応募があった。海外からは、ほぼ前回なみの 83 編の応募であった。校閲は 70 名を越える校閲委員のご協力を得て順調に進行した。校閲の結果を考慮し慎重審議のすえ、国内 85 編、海外 64 編の論文を採用することとした。

これらの論文を分野別に分類して、36 の Technical Session を編成 (5 項参照) するとともに、OS については投稿された論文を参考にしつつ、分野ごとのバランスをも考慮し、六つのセッションを組むこととし、これらセッションの委員会内担当者を次のように定め、企画の具体化をお願いした。

- (1) Advanced Computational Simulation and Design (山根・荒川委員担当)
- (2) Advanced Materials (永野進委員担当)
- (3) Tip Clearance Flow (荒川委員担当)
- (4) Ceramic Gas Turbines (佐々木委員担当)
- (5) Advanced Propulsion Technologies for Subsonic Civil Transport (永野進委員担当)
- (6) Low Emission Combustors (田丸委員担当)

特に(2)と(5)に関しては、永野進委員が担当して、IHI の協力のもとに粘り強い努力の結果成立したものである (4 項参照)。PD では、幸いなことに世界の主要なガスタービン (以下 GT と略記) メーカーから次世代向け GT に関する論文が寄せられたため、それらをピックアップして次世代 GT システムをテーマとして討論願うこととし、コーディネーターを日立の和田氏をお願いすることとした (6 項参照)。

以下に各テクニカルプログラムの概要を紹介する。これらの概要をまとめるに当たっては、それぞれの記事の末尾に記載した方々に原稿をお願いした。できる限りこれらの方々の原稿を忠実に採録したが、記述全体にある程度の統一性を保つため、若干の手を加えさせていただいた部分もある。

### 3. 特別講演の概要

#### 3.1 特別講演 I

アーヘン工科大学のガルス教授 (写真 1) による



写真 1 特別講演 I のガルス教授

特別講演は「ターボ機械内部流に関する最近の研究」と題して、ターボ機械の設計と流れの予測に関する諸問題、流れ予測のための CFD コードの開発と品質管理、多段ターボ機械の性能予測、などに関するトピックスが取り上げられ、ターボ機械内部の 3 次元粘性流れを予測することを目標とする最近の研究成果から、多数の例を引用しつつ研究の現状と展望が紹介された。

ターボ機械内部流れの予測に関する問題では、数値解析による予測の精度は、幾何学的な形状や流れの条件に関する十分な情報を伴う質の高い詳細な実験結果との比較を通じてしか行えないものであることが強調された。非定常流れに関しては、ターボ機械、特に多段ターボ機械には付きものの動・静翼干渉に起因する非定常効果、およびフラッターやノイズに関しても言及された。

流れ予測のための CFD コードの開発と品質管理に関しては、1976 年以来継続的に開催されている国際シンポジウム “Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines and Propellers” を取り上げ、このシンポジウムの一環として 1986 年に非定常流に留意しつつ Bolcs と Fransson によって設定された、一連の標準的翼列配置についての実験データのおかげで、その後多くの数値コード開発者がその結果を検証するのに役立っていることが指摘された。なお、1994 年シンポジウムの段階では、翼列配置は 2 次元の直線翼列に限定されているが、近い将来に 3 次元の標準的翼列配置が設定され実験データがそろえられることを期待しているとのことであった。

CFD によるシミュレーション能力が急速に進



歩し広く利用されようとしている現在、ターボ機械業界では利用可能な諸シミュレーション技法の有効性に関する正確な評価が必要となっている。例えば Denton が提唱している“blind”テストではコード開発者以外の第三者による計算実行や、同一幾何条件下での多様な CFD コードによるシミュレーション結果の比較、などが客観的な評価に向けて必要とされている。

ガルス教授は、ターボ機械は未だ多様な解決すべき問題群を抱えており、成熟した技術段階にはほど遠いが、一方で開発コストの低減、迅速な設計、開発リスクの低減などを目指して、現在ではあらゆる問題を全て理論的に扱おうとする方向に向いつつあることを指摘して講演を締めくくった。

(千葉工大・有賀一郎/東芝・長妻宏記)

### 3.2 特別講演 II

米国エネルギー省 (U. S. DOE) のワスロー氏 (写真 2) による特別講演では「DOE の先進タービンシステム (ATS) 計画」が紹介された。DOE では Office of Fossil Energy (FE) と Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EE) の 2 つのグループが共同して ATS を推進しており、前者は電力会社用の大型ガスタービン、後者は材料開発と産業用のガスタービンを分担している。ワスロー氏は後者に属しているが、講演では両グループの活動が紹介された。DOE は 2000 年代の発電プラントの開発を目指して ATS を 1992 年に開始し、2000 年に商用のデモンストレーション・プラントを建設するスケジュールで民間の開発費を分担している。

米国政府は天然ガスの利用を拡大するためガスタービンを改良する ATS を推進している。この



写真 2 特別講演 II のワスロー氏

技術は将来、石炭やバイオマスの利用にも役立つはずである。開発中のサイクルの中にはケミカル再生サイクル、湿り空気タービン、カーリーナサイクルなど斬新なものが含まれている。電力会社用にはアドバンスドガスタービンを用いたコンバインドサイクルが最も実現性が高いが、斬新なサイクルについては種々のメーカーが新しいアイデアを提案しているので将来はわからない。しかし実現するのは ATS の期間より後になると予想される。

DOE がスポンサーになって Solar 社が開発した High Performance Steam System は電力会社用に転用すれば ATS を更に改良する可能性がある。ATS の目標は電力会社用で熱効率 60% (LHV) 以上、産業用で 1991 年式のエンジンより 15% の効率向上、NO<sub>x</sub> は 9 ppm、CO は現状より 10% 減である。現在フェーズ 3 の要素の製造、試験の段階にあり、電力用では GE、WH、産業用では Solar と Allison の 4 社に絞り、研究開発の委託をしている。WH 社の 501 G は ATS の中間技術成果を応用している。GE の H 型は GE 社の ATS のタービンの概念を示している。Solar 社の ATS タービンは再生式であり、Allison 社の ATS タービンは最新の航空エンジン技術を用いている。材料と製造技術に関して現在進んでいるのは、セラミックコーティング、単結晶翼の大型化、材料特性、技術情報交換である。セラミックコーティングでは 24000 時間の寿命を目標としている。

また DOE では産業界と大学のコンソシアムに対して資金を出し、ATS を支援する 32 テーマの研究を大学に委託している。燃焼について 11、熱伝達について 11、空力、材料についてそれぞれ 5 である。(武蔵工大・荒木達雄記)

### 3.3 特別講演 III

通商産業省工業技術院が 1989 年度から 10 年間 (予算約 280 億円) の計画で進めている国家プロジェクト“Super/Hyper-sonic Transport Propulsion System Program”に関し、担当の研究開発官である近藤正幸氏 (写真 3) から、その目的、研究開発体制、研究開発の内容とともに、最近の成果が紹介された。

マッハ (M) 5 での飛行を可能とする超音速機用



写真3 特別講演Ⅲの近藤氏

エンジンの基盤技術を確立することを目標に、ターボジェット (TJ) とラムジェット (RJ) を複合化したコンバインドサイクル (CC) エンジンの形態選定を終り、目標エンジンの 1/10 推力のサブスケールエンジンによる技術実証に向けた研究開発が順調に進められている。これまでに、TJ ならびに RJ の種々の要素研究と並行して、TIT = 1700°C 級コアエンジン試験が、また 1994 年からは M3 飛行相当の入口空気加熱条件を含む TJ 実証エンジン試験が石川島播磨重工のエンジン運転セルにおいて開始されている。インテーク、排気ノズルを含む RJ システムについても M5 飛行状態模擬を含むフリージェット試験が航技研 (NAL) 角田宇宙推進技術研究センターの RJ 試験設備において進められている。

プロジェクトには、日本企業 (IHI, KHI, MHI) の構成する超音速輸送機用推進システム技術研究組合 (HYPR) と、米国 GE 社, UTC 社, 英国 RR 社, フランス SNECMA 社がそれぞれ新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) との契約により研究開発を推進する傍ら、国研として NAL, 機技研, 計量研, 大工研が先端技術研究, HYPR との共同研究ならびにプロジェクト推進支援等を行っている。

特筆すべきは、我が国の国家プロジェクトとして初めて海外企業——それも、世界の 4 大ジェットエンジン製造会社が重要パートナーとして参加し、極めて良好な関係のもとにプロジェクト推進に協力していることである。

今後は、TJ の高空性能試験が GE 社で、野外騒音試験が RR 社で、さらに CC エンジンの機能試験が GE 社で予定されている。(NAL・能瀬弘幸

記)

#### 4. オーガナイズドセッションの概要

##### 4.1 OS-I: Advanced Computational Simulation and Design

(オーガナイザー: 東工大・山根隆一郎)

このセッションは、最近の CFD の進歩がコンプレッサ、タービン、翼列などガスタービン要素の設計にいかん有効であるかを現時点で考えてみようという観点から企画されたもので、6 編の論文がそろえられた。

山本 (東北大) は高次精度差分法を導入して非定常の衝撃波/渦の相互干渉をシミュレートする計算手法を報告し、応用例として翼列の境界層と伴流に対する衝撃波の干渉を計算した。非定常の遷音速ガスタービン翼列、超音速圧縮機翼列の計算例から、本手法が頑健かつ高精度であることが示された。

Bohn (Aachen) は、現在設計において最も難しいとされる高圧タービンノズルのガイドベーンにおける空力的および熱力学的予測を数値解析で試みたものであり、具体的には高温ガスと翼本体との熱伝達の様子を調べた。実験結果との比較から、冷却された翼表面と主流との相互干渉や衝撃波などの複雑な流れにおける温度分布を良く再現できることが示された。

Amano (Wisconsin) は高次精度の乱流モデルつまりレイノルズ応力方程式モデルを組み込んで、軸流タービンの動翼、静翼における周期的な非定常流れの数値予測を試みた。その結果は実験と比べて妥当なものであった。また、翼の振動が圧力場や全体性能に変化をもたらす可能性があり、この相関が将来の研究として興味あるテーマであることが紹介された。

Teipel (Hannover) は、種々の乱流モデルを利用して遠心圧縮機ディフューザの数値解析を行った。2次元の剥離のない条件では、0 方程式である Baldwin-Lomax, 2 方程式である  $\kappa-\epsilon$  モデルの差はないものの、剥離のある場合は 0 方程式ではモデルの修正が必要であった。しかし、計算時間は 2 方程式に比べてほぼ半分済む。

Biswas (東芝) は、低レイノルズ数  $\kappa-\epsilon$  モデルを利用して、翼面の遷移を求める試みを紹介した。新しい提案として、壁面の減衰関数パラメー

タとして、壁面からの距離ではなく乱流レイノルズ数を選択し、壁面近傍と乱流発達領域との適切なブレンディングを行い、結果として従来の乱流モデルより改善できることを示した。

松尾 (NAL) は世界最高速と言われる大型計算機 NWT を利用して、ターボ機械における非定常翼列の干渉流れを大規模シミュレートした。ATP における二組の反転プロペラ、遷音速ファンの動/静翼を、並列計算機にあわせて多数の領域に分割し、各々の CPU で効率的に計算する手法で解析した。前者では衝撃波が正確に捉えられ、また後者では動翼の伴流が静翼と干渉している様子が再現できた。(山根隆一郎記)

#### 4.2 OS-II: Advanced Materials

(オーガナイザー: IHI・大鍋寿一)

先進材料のセッションでは 4 論文が発表された。

J. Garnier (DuPont) は化学蒸着により形成された先進繊維強化セラミックス (CMC) や DIMOX™ について発表し、二つの異なる CMC 形成法に関して幅広いレビューを行った。その一つは気相 CVI を使用した炭化珪素マトリックス蒸着と、他はアルミニウムの酸化マトリックスに対して液状メタルとガスを反応させることから直接酸化金属を生成させる DIMOX™ である。CMC タービンエンジン燃焼器や成形、試験結果が発表された。

八田 (文部省宇宙科学研究所) は炭素/炭素複合材料のエアターボラム・ジェットエンジンのタービンディスクへの適用をねらってなされた可能性研究を紹介した。C/C 複合材料での最適設計が二種類の構造、すなわち一体型と分割型について研究された。一体型は三軸方向強化された一体成形よりなっており、分割構造は三要素からの組立構造となっている。

武田 (東京大学) は高温 CMC のマイクロ破壊力学による界面の効果についての基礎研究と題し、日本の NEDO によって援助された国際共同研究プロジェクト (1991 年 4 月-1994 年 3 月) を通して得られたいくつかの結果について報告した。三つの異なった厚さの炭素コーティングをした SiC 繊維によって一方向強化されたボロシリケート・ガラス複合材料について、系統的に特性評価をおこなった。

弘松 (先進材料利用ガスジェネレータ研究所) は日本の政府機関と 14 の日本企業により 1993 年に開始された先進材料利用ガスジェネレータの研究開発を紹介した。将来の高性能ガスジェネレータの要素に対して、先進材料がそのプロジェクトで開発中である。

これらの発表ののち質疑応答が活発になされた。その代表的なものは次の通りである。

- (1) CMC 使用部材に対する設計クライテリアに関する質問に対し、Garnier は設計は弾性限でなされるべきとした。一方、武田は設計クライテリアは最初のクラック発生であるべきとコメントした。
- (2) AMG プロジェクトに対して先進材料によるエンジン開発段階が必要とのコメントに、弘松はこのプロジェクト目標は要素開発までで、実際の使用にあたってはエンジン開発段階がこの後に必要であることは認識していると回答した。なお、Garnier は全ての質疑応答が終わった後、Rensseler Polytechnic Institute によって製作された高温複合材料に対する設計ツールのビデオをロビーで紹介した。(大鍋寿一記)

#### 4.3 OS-III: Tip Clearance Flow

(オーガナイザー: 東大・荒川忠一)

本セッションはチップクリアランス流れの研究を遂行している研究者を集めて、最新の情報を交換することを目標に企画され、5 編の論文が読まれた。

渡辺 (東大) らは、実験および数値解析により、回転のない平板翼におけるチップクリアランス流れの 3 次元構造を明らかにした。翼端の洩れ渦と翼面の剝離渦が干渉し合い、その翼端間隙が小さいときには、前縁近くで翼端渦が巻き上がり、その大きさは後縁に近づくにつれて減衰すること、逆に間隙が大きいときには、翼端渦が翼の後半部で成長し、下流まで広がっていくことが判明した。

古川 (九大) らは、高比速度の斜流送風機の回転翼における翼端の洩れ流れの挙動を、実験・数値解析により調べた。間隙が大きくなる、あるいは流量が減少すると、洩れによる低エネルギーの流体は、軸流送風機とは対照的に、圧力面から負圧面に移動する。これらの現象は、ケーシングに近い回転翼間の流路で発生する、負圧面への二次

流れに由来すると結論づけている。

松岡 (KHI) らは、遷音速圧縮機の翼端洩れ流れの数値解析を行い、その信頼性を確認した。数値解析コードは、大流量に対しては全体性能を良く評価できるが、失速点を正確に評価することは難しい。設計点の運転状態において、翼端洩れ流れは、それが無い理想的な場合に比べて、より大きな圧力上昇、大きな転向角、および衝撃波との明確な干渉を引き起こすことが明らかとなった。

Wiedermann (MHI) は翼端渦を含むターボ機械翼列の3次元粘性影響のCFD解析を報告した。乱流モデルとして単純なBaldwin-Lomaxモデルを利用しても、定性的には実験データと良く一致した解が得られ、汎用性の高い $\kappa-\epsilon$ モデルを利用すると多少の改善が得られる。入口境界条件がNavier-Stokes方程式の解に大きな影響を与えるため、流入する境界層の速度分布などに対して十分な配慮を行う必要が指摘された。

野崎 (NAL) は、二つの手法で3次元翼列解析における翼端間隙の影響を調べた。翼端表面を正しく平面として表すマルチブロック法を採用した場合、計算の簡略化のためにその表面形状を三角形と仮定した場合に比べて、数値解析結果は詳細な流れ場を表現できることを明かにした。

以上の発表から、主に数値解析によるチップクリアランスの流れ解析の可能性と限界が明らかとなった。より細かい格子および洗練された乱流モデルの導入が正確なシミュレーションに必要であろうこと、また実験についてもチップクリアランス流れの制御などの可能性について調べる必要があることが話題となった。(荒川忠一記)

#### 4.4 OS-IV: セラミックガスタービン

(オーガナイザー: 東海大・伊藤高根)

このセッションでは、実現が期待されているセラミックガスタービンについて、現在各国で進められている開発プロジェクトの現状を報告しあい、討論を通じて貴重な情報を交換しあうことを目的に開かれ、7件の発表がなされた。初めの4件はわが国の300 kW級CGTプロジェクトに関するもので、プロジェクト全体の概要が先ず報告された後、3つのエンジン(CGT 301, 302, 303)についてそれぞれの開発状況が報告された。途中さまざまな問題が発生したが何れのチームもそれぞれの

問題を克服し、オールセラミックエンジンで中間目標である1200°Cレベルの運転が開始されていることが報告された。5番目は米国DOEのプロジェクトとして1992年から6年計画で進められているコージェネレーション用ガスタービンのセラミックス化に関するCSGTプロジェクトの開発状況が報告された。ソーラ社のCentaur-50 Sエンジンの燃焼器及び初段のタービン段をセラミックスで置き換え出力増大と効率向上をねらったものでセラミック材料の選定、部品のリグテストが行われていること、最終段階では4000時間のフィールドテストが予定されていることが報告された。6番目の発表はECのAGATA計画に関する報告で、自動車用ハイブリッドエンジン用セラミックガスタービン(60 kW)の主要セラミック要素の開発を目的としており、主要要素としてラジアル式タービンロータ、伝熱式熱交換器、触媒式燃焼器を選び、それらの材料選定を終わり、モデル部品の製造、予備テストが行われている状況が報告された。最後の報告はわが国の自動車用100 kW級CGTプロジェクトの状況についての報告であり、タービン入り口温度1200°Cでの運転が開始され、100,000 RPMで72 kWの出力が得られたと報告された。全ての発表に対して討論もきわめて活発で、終了時間の18時を守るのがやっとであった。

セラミックガスタービンの研究開発は1970年台から開始され今まで部品レベルでは非常に大きな技術進歩が見られたものの、エンジンとしては見るべき成果がなかなか得られ無いというのが現状であった。しかし今回の発表では日本のプロジェクトを中心に1200°Cレベルの運転が開始されており、エンジン熱効率も小型としては約30%と言うすばらしい値が得られ、出力も予定に近い値が計測されるなど、エンジンとして優れた素質の片鱗が見え始めている。米国では長時間の実機評価実験も計画されており、いよいよセラミックガスタービンの実用性の評価が始まるレベルに到達した。最終目標の1350°Cの運転までには新たな壁があるが、将来が大いに期待できそうとの感触が得られた。(伊藤高根記)

#### 4.5 OS-V: 亜音速民間航空機の先進推進技術

(オーガナイザー: IHI・玉木貞一, 永野進)

このセッションでは6編の論文が発表された。

J. L. Cabe (GE) は亜音速民間航空エンジンの新しい開発プログラムをスタートさせるにあたり、どの程度先進技術を取り込むかを決定する方法を示した。取得コストを低く、かつオペレーティングコストを低くするという観点で技術を評価するために、直接運航コスト、成功確率、開発コスト等を因子とした関数を用いている。また、例としてサイクル温度の選定は新エンジン設計に重要な因子であることを示した。

H. L. Lichtfuss (MTU) は環境適合性のあるエンジンの戦略を示した。航空輸送は将来とも地上輸送に比べ発展の度合いが高いと予想され、そのためエミッションレベルを継続的に減少させることが要求される。NO<sub>x</sub>の低減は燃焼システムを変更することで技術的には可能であるが、そのため機構が複雑になり信頼性が問題となる。エンジンメーカーとしては環境に適合し、顧客の要求を満足させうる最良のエンジンを見出すことが課題であることを述べた。

T. L. DuBell (P&W) は環境に関する規制と技術の現状と将来動向について概説した。最初に現在まだ、高々度のエミッションの環境への影響について、規制値を確定させるほど定量的に評価できていないことを指摘した後、多段燃焼器、予混合予蒸発希薄燃焼器や過濃希薄燃焼器等のNO<sub>x</sub>低減研究の状況を示した。最後に亜音速航空機でNO<sub>x</sub>エミッションをこれ以上急激に減らすのは、その燃焼システムは間違いなく重量、コストと耐久性や運用性の問題を増加させるため、非常に大きな挑戦となることを強調した。

弘松 (AMG) は先進材料利用ガスジェネレータ研究所の研究状況を紹介した。概念性能検討、高速、高負荷、高圧力比圧縮機、タービン、低NO<sub>x</sub>燃焼器、先進コントロール、センサー等の研究が概説され、新材料の適用が先進的な推進システムには重要な役割をすることを示唆した。

R. J. Moore (BMW-RR) は現在開発中のBR 700エンジン一族の状況を紹介した。BR 700エンジンでは信頼性を維持し、コストを抑えるため、共通コアの概念を採用していることを示した。

遠藤 (NAL) は航空宇宙技術研究所で行われている超高バイパス比エンジンの研究状況について

紹介した。特に、リフトファンエンジン概念の研究とダクトファン空力、低公害燃焼器、超高温タービンの研究等について示した。

発表の後、会場からの質問、意見に関し、パネル形式で、エンジン概念、環境適合技術、先進材料の適用等について討議が行われた。(玉木貞一記)

#### 4.6 OS-VI: 低排出燃焼器

(オーガナイザー: NAL・田丸 卓)

実用段階あるいはそれに近い開発段階にある低NO<sub>x</sub>排出燃焼器に関する6論文の発表と討議を行った。それらのうち4論文は燃焼方法を工夫することによりNO<sub>x</sub>低減をはかる、いわゆるドライNO<sub>x</sub>低減技術に関するものであり、他の2論文は触媒を用いた燃焼技術である。

最初に議長の田丸(航技研)がこのセッションの構成と論文から読み取れるNO<sub>x</sub>低減値相互比較をOHPで示した。それによると触媒燃焼器は11 ppmの排出レベルにあり、航技研のガスタービンも900°Cレベルの低いタービン入口温度ながら同等の排出を達成している。

杉本(三井造船)はブタンを燃料とする1 MWクラスのガスタービンを紹介した。

岡本(東芝)は論文中で達成したNO<sub>x</sub>レベルについては明記していなかったが講演でGEの装置と同等のレベルを達成していることを明らかにした。

L. B. Davis (GE) は25 ppm、非公式には一桁台の排出レベルまで達成し、一部のものは実用機として使われていることを明らかにした。

定森(大阪ガス)はマンガン基材ヘキサアルミニウム触媒を用いた1200°Cガスタービン用燃焼器開発について発表した。

M. B. Cutrone (GE) も触媒燃焼器について発表し、ともに11 ppmを達成したと報告した。

最後に林(航技研)は小型ガスタービンで空気を制御した燃焼器により上記のレベルの低NO<sub>x</sub>を実現したことを示した。

質疑ではGEのガスタービンに対して低NO<sub>x</sub>燃焼器で水噴射しないときのNO<sub>x</sub>排出レベルと、同社のガスタービンが既に触媒並みの低NO<sub>x</sub>を達成しているため同社触媒燃焼器研究者へ今後の研究展開を聞く質問があった。

総括すればGEなどのガスタービンのドライNO<sub>x</sub>低減技術はガス燃料に関する限り既に要素段階にある触媒燃焼器に相応する排出レベルを達成していることが明らかになった。(田丸卓記)

## 5. テクニカルセッションの概要

### 5.1 TS-A

テクニカルセッションAについては、空気力学関係8セッション25件、計測制御関係1セッション2件の論文発表というプログラムを編成した。空気力学関係については発表のキャンセルがあったため、最終的に翼列空力性能に関して2セッション4件、3次元流れ及び2次元流れについて3セッション4件、遠心圧縮機関係2セッション6件、旋回失速関係1セッション2件、合計16件の論文発表が行われ、前回大会と同数の発表件数となった。計測制御については、チップクリアランスの計測法についてとインレットディストーションがある場合に実時間シミュレーションについての2件の論文発表があった。

空気力学分野ではCFDに関するオーガナイズドセッションがあったにもかかわらず、数値解析による論文発表が多く見られた。しかし、数値解析手法それ自体についての研究というのではなく、失速流れや後縁吹出し後流など非定常流れや3次元流れなどのより複雑で高度な流れ場に適用したものがほとんどであった。また、実験を主体とした論文も失速流れに代表される非定常流れを扱ったものが多く見られ、ガスタービンに係る空気力学現象においてその不安定性や非定常性についての関心の高さが伺われた。実験的アプローチによる研究においては、その計測手法開発や計測の高精度化が極めて重要となってきたが今大会においても巧みな計測による研究が見られる一方で、実験での計測精度を言及した論文発表は少なかったように思われる。

最後に空気力学分野では諸事情によって9件の論文発表がキャンセルとなったことは残念なことであった。(NAL・村上哲記)

### 5.2 TS-B

B室のテクニカルセッションの登録論文数は28編、内9編は海外からのものであった。中国およびロシアからの各1編のキャンセルがあったが、全体的にはセッションは順調に進行し、熱心な報

告と討議が行われた。論文を内容別に見ると、熱交換器関係3編(セッションB4)、燃焼の基礎、燃焼器、燃焼系に関する論文が14編(B2, B5, B6, B7, B8)、空力・騒音4編(B1, B2)、冷却技術関係5編(B3, B9)となる。

セッションB4ではCGT100のセラミック熱交換器開発に関する報告が注目を集めた。またヘリコプター用ガスタービンへの適用を考えた熱交換器の設計、試作、試験結果がフランスとロシアの共著で報告された。

セッションB3では1500°C級ガスタービンへの適用を狙いとした第1段動・静翼の研究開発に関する総括的な報告が注目を集めた。この論文はテクニカルセッションでは冷却翼そのものに関する唯一の報告である。冷却に関する基礎的研究としては、吹き出し冷却に関連する空力・伝熱問題を主に実験的手法により扱った論文が3編とタービン軸を流れる冷却空気の非定常現象をCFDを用いて解析した結果が報告された。

空力・騒音関係の4件の報告(B1, B2)は軸流圧縮機の流れの半径方向ミキシングに関するホットワイヤを用いた丁寧な計測結果と圧縮機流れに対するラジアルミキシングの影響の評価、周期性をもつ非定常衝撃波の観測法、ファンの騒音低減、排気ダクトからの騒音の計算法などである。

低NO<sub>x</sub>燃焼技術に関するオーガナイズドセッションが別に持たれているので、Bセッションにおける燃焼関連の報告は燃焼の基礎的な取扱いに関する論文が多くなった。一方、オーガナイズドセッションのテーマからはずれるが独自の観点から興味深い課題を扱う論文も多く見られた。例えば、脱硝装置の制御に関する報告、燃焼系の振動解析とその実験的再現に関する報告は他に類似の論文がないだけに、興味深い。

B6では油滴の噴霧に関する3編が報告された。内1編は、将来の航空機用機関への適用を目的として実施されているAMGプログラムにおける希薄燃焼器用予混合予蒸発器に関する実験的報告である。B5では燃焼に関する数値解析の2編があり、内1編はNO<sub>2</sub>の生成に関する数値解析である。NO<sub>2</sub>の生成に関する実験的な研究報告もB7で行われている。

燃焼器に関しては拡散混合で2段のスワラを用

いて NO<sub>x</sub> を大幅に低減できるとする実験的研究が2編報告された。メタノール改質ガス、水素ガス燃焼器、メタン燃焼のラム燃焼器などに関する理論的、実験的研究、LIF を用いた OH, NO の計測なども興味深い。(船研・菅 進記)

### 5.3 TS-C

テクニカルセッション C は総計 25 編の論文中海外からの投稿 6 編と日本のアクティビティが目立った。また講演のキャンセルも比較的少なかった(2編)。そのうちセラミックスなど新素材に関係するものが 13 編と半分以上を占め、同時にセッションの関心度も高かった。このほかブレード材料関係 3 編、コーティング関係 3 編、設計関係(含ターボチャージャ) 6 編の構成であった。

セッション別では①材料関連、②セラミック材料の評価、③自動車用 CGT、④セラミック部品の評価 I、⑤セラミック部品の評価 II、⑥コーティング技術、⑦設計技術関連、⑧ターボチャージャ、⑨セラミック部品の評価 III、の各テーマで分類されて発表された。

①では第 1 ノズルの材料劣化解析および単結晶ノズルの製造技術に関する論文が読まれた。タービンブレード寿命に及ぼすエロージョンの影響に関する論文はキャンセルされた。②ではセラミック材料の評価として、燃焼ガス下でのシリコンナイトライド(以下 SN と略記)の高温破壊挙動、X線 CT によるセラミック部品検査および X線 CT によるガス圧焼結 SN のクリープと酸化の挙動に関する発表があった。③では自動車用セラミックガスタービンのコンポーネント開発に関連して、セラミック低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の開発とその性能試験結果、セラミックタービンロータと静止部の開発ならびに性能試験結果、およびセラミックラジアルタービンロータの回転破壊解析結果が報告された。④では HPSN 円盤ロータのサイクリック熱負荷評価に関する論文とセラミック複合材ボルト/ナットの開発に関する報告があった。⑤では、いずれも 300 kW 級 CGT と関連して、はめ込み式セラミック軸流ロータブレードの常温ならびに高温回転評価結果が報告された。⑥では高温から材料を保護するための各種コーティング技術についての設計・試作・評価結果が報告された。⑦ではコンカレントエンジニアリング時代のター

ボ機械の設計と開発法に関する報告やインパルスガスタービンの最適設計に遺伝的アルゴリズムを利用しようとする試みが紹介された。⑧ではターボチャージャの無次元マッチングと概念設計、ターボチャージャ用圧縮機の 3 次元解析およびターボチャージャ用混合流タービンの開発について論文が読まれた。⑨では大型ガスタービン用セラミック静翼の高温下での信頼性評価や 1,500°C クラスの空冷第一段タービンノズルの設計・開発・試験結果が報告された。(日産・佐々木正史記)

### 5.4 TS-D

テクニカルセッション D は①振動、②新サイクルガスタービン、③航空転用型システム、④軸受、⑤試験・運用実績 I、⑥試験・運用実績 II、⑦ガスタービン開発、⑧パワープラント開発、⑨ガスタービン部品の熱解析、の各テーマで合計 26 編の論文発表が行われた。

①ではパネル法による動翼-静翼-ストラット系空力干渉の解析、遠心圧縮機インペラのアンダーカットの翼振動特性への影響およびシュラウドつきタービン動翼の減衰挙動解析が取上げられた。②では水素で静翼を冷却した後、再熱させてサイクル効率を高める再燃式水素燃焼ガスタービンおよび静水圧を利用した等温圧縮機を持つガスタービンサイクルの紹介があった。③ではテクノスーパーライナー用 MFT 8 型ガスタービンとそのパワータービン開発、LM 6000 型ガスタービン発電設備と運用実績および次世代艦艇用機関としての中間冷却器つき再生型ガスタービンの開発状況の紹介があった。④では軽負荷高速円筒ころ軸受の、ころ-内輪間の滑りについて DN 値 300 万までの実験結果および玉だけがセラミックスのハイブリッド玉軸受の DN 値 200 万までの実験結果について報告があった。⑤、⑥ではメタノールの改質反応を利用した廃熱利用型ガスタービン発電システム、コンピュータ非常用電源としての 22.4 MW ガスタービン発電プラント、GT 13 E 2 システムの長期実証試験結果、V 64.3 ガスタービン発電システム、用途および改造度合別既設プラントのリパワリングシステムならびにガスタービン圧縮機翼改造前後の性能予測手法の検証結果についての紹介があった。⑦では最新のガスタービン Taurus 70 の開発、1500°C 級事業用大型ガス

タービンとその要素技術開発および出力2.6 KVA 超小型発電装置の紹介があった。⑧ではわが国における1300°C級アドバンスドコンバインドサイクルプラントを中心とした発表と欧米での石炭ガス化複合発電プラントの現状と将来展望および蒸気噴射による排熱回収の研究についての報告があった。⑨では圧縮機流れ場における温度予測を可能とする電算機コードの開発およびカラーペイント変化によるガスタービン部品の作動温度推定についての発表が行われた。(IHI・永野進記)

## 6. パネルディスカッションの概要

「次世代先進ガスタービンシステム～効率, 使い勝手, 環境適合性」をテーマとするパネル討論では, 最終日午後のプログラムにも拘らず250人前後の聴講者が参加し約4時間に及び発表と熱心な討論が展開された(写真4)。次世代ガスタービンに関しては4人のパネリストから発表があり, 共通のキーワードは効率, 環境, ライフサイクルコストであった。

①Corman (GE) は, 熱効率60% (LHV) を達成する“H”シリーズGTの概要を述べた。タービン動翼入口温度1,430°C, 圧力比23の仕様である。このGTの特徴はタービン翼の冷却にクローズド蒸気冷却方式を採用したことで, 現用の空気冷却方式の欠点であるガス温度の希釈を小さくし性能向上を図れるほか, 燃焼器出口温度をあまり上げなくて済むため低NO<sub>x</sub>化に対しても有利になる。耐熱材料としては単結晶材や遮熱コーティングを適用している。

②Althaus (ABB) が紹介したGT 24/GT 26ガスタービンは, シーケンシャル燃焼を特徴としたいわゆるレヒートサイクルにより性能向上を図っている。これによりあまり燃焼温度を上げずに高効率化が達成できるため低NO<sub>x</sub>化に有利となっている。レヒートサイクルの効果を生かすため高圧力比化がはかられ, 産業用GTでは最高の圧力比30を22段で実現している。低NO<sub>x</sub>燃焼器としては旋回流の渦崩壊現象を保炎に応用したEVバーナを用いたアニュラ型燃焼器が特徴である。

③Joyce (Siemens) は3AシリーズGTを紹介した。シンプルサイクルで熱効率38%, コンバインドサイクルで57%を達成するもので, いくつかの候補の中から信頼性を重視して選定されたGT



写真4 パネルディスカッション

であり, 伝統的なSiemens社GTの基本構造とPratt & Whitney社の航空エンジン技術を融合させた設計である。また燃焼器も従来のサイロ型から高温化, 低NO<sub>x</sub>化に有利なアニュラ型に変更している。圧縮機は航空用で実績のある3次元空力設計法を用いた圧力比16.5を15と少ない段数で達成している。

④福江 (MHI) は燃焼器出口温度1,500°C級の“G”シリーズGTの要素技術と実証試験の状況を報告した。冷却翼は全面フィルム冷却を用い, 燃焼器の冷却には蒸気冷却を採用して希薄予混合度を増すことにより低NO<sub>x</sub>化に対応しており, NO<sub>x</sub>の排出量として25 ppm (15%O<sub>2</sub>換算)を試験で確認している。また, 蒸気クローズド冷却を採用した“H”シリーズも要素技術を開発中であることを公表した。

以上の諸機種は熱効率で57~60% (HHV) を達成するもので, 現在の最新鋭機に対し3~6ポイント効率が高い。出力的には①, ④が圧縮機吸込流量を増し大出力化を図っているのに対し②, ③は風量の増大は意図していない。これは単機容量の適正值に対する考え方の相違によるものと思われる。耐熱材料としては単結晶や一方向凝固合金が産業用GTでも一般化してきており, ①と④では遮熱コーティングを行っている。冷却方式としては①のクローズド冷却方式以外は航空用GTで実績のある全面フィルム冷却方式を採用し冷却性能の向上を図っている。NO<sub>x</sub>値はどの機種も25~9 ppm級を目標としているが, 環境コストとランニングコストとの配慮から②, ③ではあまり燃焼温度を上げずにサイクルの工夫やコンポーネ



ント効率をあげて高効率化を達成しようとするなど、各社の設計思想の差が見られる。いずれにしても極限に迫る性能を追求するため、いかに信頼性と両立させるかが重要な課題で、1996～1997年には試運転または営業運転が開始される。

これらの発表に対し8名の討論者とパネリストの間で、

- ・単機容量の選定, 50/60 Hz 機の交換に関する設計思想
- ・クローズド蒸気冷却の信頼性と蒸気のシール法・冷却用蒸気の最適抽気位置
- ・ボトミングサイクルの効率向上
- ・低 NO<sub>x</sub> 化と燃焼器の冷却方式
- ・レヒートサイクルのコスト面での競争力
- ・シーケンシャル燃焼器バーナの冷却方法

などについての活発な質疑応答が展開された。最後に議長が、次世代 GT には性能, 環境, コスト, 信頼性のバランスが重要である, と締めくくり閉会した。(日立・和田正倫/川池和彦記)

## 7. おわりに

今回の論文委員会においても、いくつかの点で従来の方式を改善する試みを行った。

- (1) 論文募集に際して、論文申込のプロセスを廃止した。当国際会議も回を重ねるにつれ、応募論文の規模などがほぼ予測可能となったからである。
- (2) 本論文を執筆していただくに際し、組織委員会から B4 版原稿用紙を送付することは止め、著者から執筆要綱に沿った A4 版カメラレディー原稿を送付願うこととした。縮小コピーやワードプロセッサの普及に伴い、指定した文字サイズ原稿を各著者の側でご用意いただくことに困難は無いと判断したためである。
- (3) Proceedings のサイズは、従来の国際版から A4 版に改めることとした。国内における各種文書の A4 版への統一機運に同調するためである。
- (4) 会議当日の Author's Briefing は原則廃止とした。予算面での節減もさることながら、論文委員会委員に負担がかかる割には、ぜひ必要とも思えないからである。その替わり、各セッション

会場入口に掲示板を用意し、取消論文や座長の変更に関する情報を速やかに供給することとした。なお、OS や PD に関しては、事前の打ち合わせが必要と考えられるので、当日の昼食時に Meeting を設定した。

- (5) 講演発表では、あらゆるセッションを通じて通訳は付けないこととし、その替わり各セッション会場には少なくとも一人の論文委員会委員が張り付くこととした。通訳の必要性については未だ議論の余地が残るところであり、海外からの参加者の一部からは通訳がいないとディスカッションが不十分に終るとの指摘もあった。会議の全体を振り返れば、会議の運営そのものは、会場担当として隅々にまで神経を配って下さった菅委員の指揮のもと、事務局の(株)コンベックスのスタッフ、ならびに各大学からのアルバイト学生諸君の協力を得て、極めて順調に進行した。

なお、論文委員会は合わせて17回を数えたが、その大部分は(株)ニッセイエブロの会議室をお借りして行った。また、旧ソ連からの会議参加者の便宜を図るため、荏原製作所のご厚意で会議期間中の宿舎を提供していただいた。結果的には、入国査証の遅れから一部来日できない者もあったが、利用させていただいた参加者にとっては、このうえもない助けとなった。紙面を借りてお礼を申し上げたい。

以上、1995年国際ガスタービン会議横浜大会を振り返れば、海外からの論文投稿の伸び悩み、Proceedings 採録論文の講演発表一部取り消しなど、今後検討すべき問題もいくつか残った。しかし、2年間に及ぶ論文委員会諸兄の献身的な努力、ならびに校閲委員として、また座長として快く協力して下さった多くの方々のお蔭で、大過なく横浜大会を終了することができ感謝に耐えない。

また、この報告をまとめるに当たり、多くの方々にお執筆をお願いしたところ、年末のご多忙な時期にも拘わらずお引き受けいただいた。併せて御礼申し上げたい。最後に、この大会の事務局として、企画・準備・運営のあらゆる面で誠心誠意サポートをして下さった(株)コンベックスのスタッフの方々に心から御礼申し上げる。

# 1995 年国際ガスタービン会議報告 展 示

展示委員会委員長 和田正倫

今回の1995年国際ガスタービン会議の論文発表やパネルディスカッション等を行う講演会に対しそれに併設される形でガスタービン展示会が10月23日から26日までの4日間開催されました。

展示会の会場となったのは前回の1991年の国際ガスタービン会議の時と同様、講演会会場である“パシフィコ横浜”会議センターに隣接した展示専門の“パシフィコ横浜”展示ホール“A”です。この展示ホールは3300平方メートルの広さですが、ここに会期中に3600人の方々に訪れて頂くことができました。展示に参加した企業や研究所の数は37社、総小間数は140(1小間の大きさは2.7メータ四方)に上りました。



計画当初、折りからの不況の影響を受けるのではないかと危惧されましたが、小間数および会期中の参観者数共に前回を上回る結果となりました。

後述する出展社リストに示されているように世界の主要ガスタービンメーカーは殆ど全て参加しており、その事実は、我が国のガスタービン市場としての魅力の高まりを如実に示していると考えられます。又、不況にも拘わらずより充実した展示となったという事は、わが国に於いてもガスタービンが高効率、環境対応型原動機として受け入れ

られるようになり、且つ、将来の発展を期待されているという事と、その結果としての新技術、新製品、開発動向等に対する関心の高まりを反映したものと考えられます。

展示の概要をかいつまんで以下に紹介します。

## 1. 大型最新鋭ガスタービン

大型ガスタービン各社のブースでは、現在開発中の1500°C級最新鋭ガスタービンに関する技術情報がパネル等で紹介されていた。特に、ガスタービンの熱効率をコンバインドサイクル運転時に高めて、更なる省資源、環境対応型とする目的で開発段階にある蒸気冷却技術がこの様に一般に紹介されたのは、日本ではこの展示会が最初ではないかと思われる。



米国のGE社は燃焼温度1500°C級の50サイクル用MS 9001 H及び60サイクル用MS 7001 Hの両モデルを紹介していた。第1段静翼及び動翼の双方に蒸気冷却を適用するもので、その蒸気はコンバインドサイクルのボトムリングサイクルから取り出し、ガスタービン冷却後再びサイクルに戻し、冷却と同時に熱回収を計る事によりコンバイ

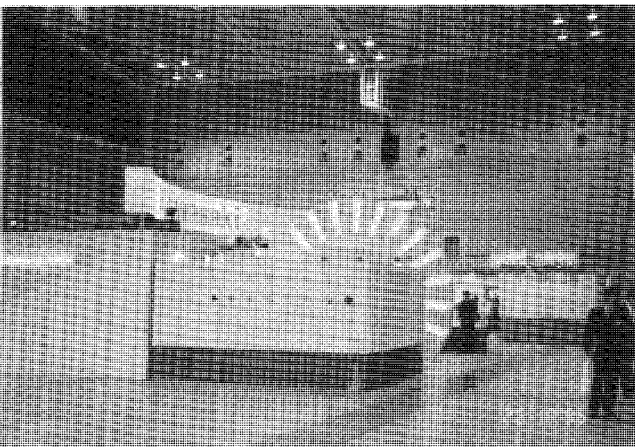
(平成8年1月16日原稿受付)

ンドサイクルとしての高効率化を狙ったものである。



三菱重工も開発中の“G”モデルを紹介していた。燃焼温度 1500°C 級で蒸気で冷却する燃焼器を装備する 60 サイクル用の 501 G と 50 サイクル用 701 G の 2 機種である。

東芝は蒸気冷却を適用した第 1 段静翼を展示していた。東北電力との共同研究で開発中の実験室段階の製品であるとの説明がなされていた。



川崎重工は提携先の ABB 社で開発中の 2 段燃焼を適用する事により高効率を狙うという大変ユニークなガスタービン GT 24 及び GT 26 の 2 機種を紹介していた。

富士電機とシーメンスは共同の展示ブースを設けて、シーメンスがほぼ開発を終了したという V 64.3 A 型ガスタービンをその模型を使って紹介していた。

## 2. 低 NO<sub>x</sub> 燃焼器

ガスタービン排気ガス中の NO<sub>x</sub> 低減方式として従来用いられた蒸気或いは水噴射を使用しない方式を乾式と呼び区別していたが、最近では特に



断わらない限り、低 NO<sub>x</sub> 燃焼器と言えばこの乾式を指すようになってきたと言ってよいと考える。今回の展示では殆ど全てのガスタービンメーカーが各々に開発した低 NO<sub>x</sub> 燃焼器を実物、或いはパネルを使用して紹介していた。日立や東芝等の予混合方式を基調とする方式は元より、それと触媒燃焼方式との組み合わせという三菱重工のアイデア、或いは ABB の EV バーナというユニークな方式等、環境対応型原動機としてのガスタービンの将来にとって必要不可欠なこの技術の開発は展示会参観者には興味の尽きないものであった。

## 3. 航空用エンジン

石川島播磨重工は V 2500 型ターボファンエンジン・ファンモジュール実物、及び、LM 6000 型航空転用エンジンを用いたコンバインドサイクルプラントの模型を展示していた。



三井造船も GE 社の LM シリーズ航空転用型ガスタービンを製品ラインアップに加えている旨発表していた。これは LM シリーズのパッケージである Stewart & Stevenson 社との提携に基づく由であった。



荏原製作所は Pratt & Whitney Canada 社の PT 6 型エンジンを用いた航空転用 ST 6 型ガスタービンを展示していた。

三菱重工も MFT 8 型航空転用型エンジンを展示。最近の日本でのコジェネレーションに対する需要の増加により、航空転用型がより脚光を浴びている状況が今回の展示にも反映されている。

#### 4. 小容量ガスタービン

川崎重工は自社開発の 150 KW から 6000 KW 迄のガスタービンの非常用電源やコジェネレーション用としての製品シリーズを発表。特に、最近の開発成果である 6000 KW のガスタービンの実機を展示し参観者の注目を集めていた。

三井造船の 1 MW から 21 MW 迄の SB シリーズガスタービンや日立の H 25 型 25 MW ガスタービンも紹介されていた。何れも独自に開発したガスタービンである。

Solar Turbines 社も提携関係にある新潟鉄工所やヤンマーディーゼルの 1 MW から 10 MW に亘る出力レンジをカバーしている Solar Turbines 社製のガスタービンシリーズを紹介してい



た。

ヤンマーディーゼルの独自開発ガスタービン AT シリーズ (169~2133 KW) も主として非常用電源用として、又、非常用機械駆動用 ATT シリーズも展示されていた。

ダイハツディーゼルは提携関係にあるオランダのオプラ社製の超低 NO<sub>x</sub> (10 ppm 以下) ガスタービン、487 KW の OP-5 型及び 1550 KW の OP-15 型ガスタービンを紹介していた。



日産自動車は大変ユニークな 2.6 KW の超小型ガスタービンを用いた携帯用ガスタービン発電装置ダイナジェット 2.6 を紹介していた。長年に亘る自動車用ガスタービンの研究の成果である由。

#### 5. ターボチャージャー

石川島播磨重工、三菱重工それに新潟鉄工所が舶用及び自動車用各種ターボチャージャーを豊富な実績と共に紹介していた。

#### 6. 新材料

ガスタービン用新材料の分野でも色々な成果が展示され、多くの参観者の注目を集めていた。

日立は 25 MW ガスタービン実機サイズのセラミック動翼、一方向凝固翼及び単結晶翼を展示していた。石川島播磨重工や三菱製鋼もガスタービン用精密鑄造製品を展示し多くの観客を集めていた。

光洋精工は大変ユニークな技術の結晶である航空宇宙用軸受け及びセラミック軸受けを展示紹介していた。

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) と(財)石油産業活性化センター (PEC) は共同の出展を行い、現在推進中のセラミックガスタービンの開発プロジェクトをその必要性や研究開発の目

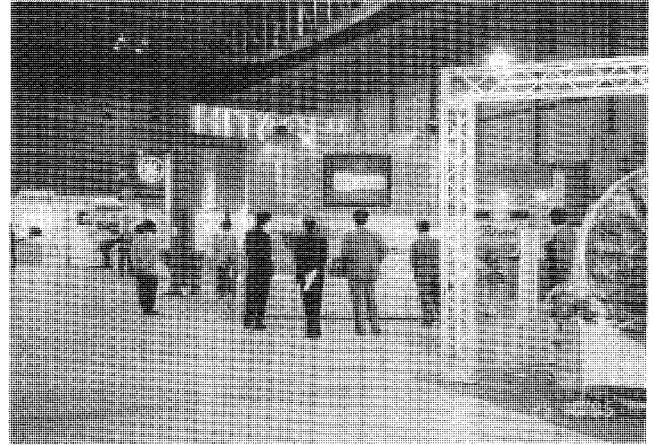


標と併せて紹介，その立派な研究成果に多くの参観者の注目を集めていた。NEDO は 300 KW 級のセラミックガスタービンのカットサンプル及び部品を展示，又，PEC は燃料の多様化とクリーンな排気を目指した自動車用 100 KW セラミックガスタービンを紹介。このガスタービンは入口温度 1350°C，熱効率 40% を目標に開発が進められており，そのために複合セラミック材や触媒燃焼の研究開発が進められているとの説明があった。先端材料利用ガスジェネレータ研究所はガスタービンエンジンがより一層環境対応型且つ小型軽量となるようそのガスジェネレータ部分に複合材料等の先進材料を利用する革新的な技術の研究開発を進めている状況を試作品を含め紹介していた。

### 7. 高効率コンバインドサイクルプラント

ここ数年間の我が国の電力系統に於ける大容量コンバインドサイクル発電プラントの設置容量の増加には目覚ましいものがある。その主な機器の供給者である日立，GE，三菱等は納入実績や運転経験をパネルで紹介していた。日立は 1300°C 級のガスタービンを用いたコンバインドプラントで，ガスタービンと蒸気タービンの両方が共通の 1 台の発電機を駆動するいわゆる一軸型コンバインドプラントのかなり精緻な模型を展示していたが，これも多くの参観者を集めていた。コンバインドプラントの主要な構成機器の一つである排熱回収ボイラについても日立，東芝，川崎重工等が模型や部品或いはパネルを用いて紹介していた。

石炭のガス化技術の開発について日立と三菱が各々のテストプラントでの成果などを紹介していた。



### 8. 計装・制御

日本ベントリーはガスタービンを含む回転機械の振動監視装置及び振動解析装置を紹介していた。堀場製作所はガスタービンの排気中の NO<sub>x</sub> 等を測定する分析計類を展示していた。

ナックはガスタービン開発等で使用される 1 秒当たり 2000~2000 万コマ撮影可能という超高速イメージコンバータカメラなどを展示。又，ピーアイ・ポリテックは 2 焦点レーザー流速計を展示していた。この流速計を用いると 3000 m/秒以上の超高速の計測が可能で，高速回転中のターボチャージャーやプラズマプレー等の超高速の流れの計測に適している由。新川電機は回転機械監視モニタ及び完全 3 重冗長化を持たせた TRICON 制御システムを展示していた。野崎産業は英国 ROTADATA 社製のタービンやコンプレッサーのチップクリアランス計測システムやパイロメータとトラバースシステムを用いて運転中の個々のタービンブレードの表面温度を計測できるタービンブレードの表面温度計測システムを紹介していた。三協インターナショナルは英国のトルクメータ社が開発したガスタービン用高精度のトルクメータを展示。ウッドワードガバナーは低 NO<sub>x</sub> 制御も含むガスタービン制御装置を展示していた。

### 9. 付属機器・設備

進和テックはエアフィルターメーカーであるドナルドソンと共同でガスタービン用各種吸気エアフィルタを展示していた。日本マリンテクノはガスタービン発電機を同期調相機として使用する時にガスタービンから発電機を切り離す為に使用される事もある SSS クラッチを展示していた。

アレンギアーはガスタービンで発電機を駆動する際に使用される減速歯車を展示。

タイヨーテクノは技術提携関係にある米国のヒリヤード社のガスタービン関連製品を展示していた。ヒリヤード社は高流量オイルフィルタや燃料油フィルタ、油静浄器等を得意としているメーカーである。

## 10. エンジニアリング及び製作用ツール

コンセプト ETI はターボ機械に関する設計や開発、設計のレビューやオージット、トラブルの原因究明などを請け負って実行するエンジニアリング能力を紹介していた。ソフトのみを商品にしている意味でユニークである。

ノーザン・リサーチ・アンド・エンジニアリング社はターボ機械に関する CAE 或いは CAM ソフトウェアの販売や設計或いは開発のサービスができる事をアピールしていた。又、羽車の 5 軸機械加工のサービスもする模様。

丸和電機も同時 5 軸によるインペラーの加工を行うほか、高速回転試験機或いは熱衝撃試験機的设计・製造・販売を行ったり、委託試験を行うなど、ガスタービンの開発に関連した内容の展示を行っていた。

東洋エクストルードホーンは航空機エンジン部品のバリ取り、R 付け、或いは面研磨等の一次加工の最終仕上げに威力を発揮する砥粒流動加工装置を持ち込んだ展示は参観者の興味を集めていた。



### おわりに

今回の展示におきましては、原則として、前回 1991 年の展示を踏襲しましたが、主として下記の点につきましては新しい事を試みました。

- (1) 展示会に関する新聞広告を電気新聞に掲載しました。
- (2) 展示会のポスターを作成し、学会の賛助会員各社や学校などに配布しました。
- (3) 会場入り口のアーケード脇に受け付けを設け、参観者に名札を付けるようお願いしました。また、入り口にガードマンを配し、これにより、入場者数の正確な把握が可能となりました。
- (4) 展示ブース間のスペースを取るよう配慮しました。

終わって見ると色々な反省点も浮かんできます。今回の経験を次回に生かしていただける事を希望します。



以上展示の概要をできるだけ漏れが無いように記載した積もりですが、書き残した点をご容赦いただきたいと思います。

この不景気のなかであるにも拘わらず展示に参加頂いた企業の皆様及び展示委員会メンバーとしてご協力頂いた皆様にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

### 出展社リスト

1. アレンギアー社
2. 日本ベントリー株式会社
3. コンセプト ETI 社
4. ダイハツディーゼル株式会社
5. 株式会社荏原製作所
6. 株式会社東洋エクストルードホーン
7. 富士電機株式会社
8. (株)ガスタービン学会
9. ゼネラル・エレクトリック・カンパニー

10. 株式会社日立製作所
11. 株式会社堀場製作所
12. 石川島播磨重工株式会社
13. 川崎重工株式会社
14. 光洋精工株式会社
15. 丸和電機株式会社
16. 三菱重工株式会社
17. 三菱製鋼株式会社
18. 三井造船株式会社
19. 株式会社ナック
20. 新エネルギー・産業技術総合開発機構
21. 株式会社新潟鉄工所
22. 日本ドナルドソン株式会社
23. 日産自動車株式会社
24. 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
25. 野崎産業株式会社
26. (財)石油産業活性化センター
27. ピーアイ・ポリテック株式会社
28. 株式会社先進材料利用ガスジェネレーター研究所
29. 三協インタナショナル株式会社
30. 新川電機株式会社
31. 進和テック株式会社
32. ソーラータービイズインコーポレーテッド
33. 日本マリンテクノ株式会社
34. タイヨーテクノ株式会社
35. 株式会社東芝
36. 日本ウッドワードガバナー株式会社
37. ヤンマーディーゼル株式会社

## 入 会 者 名 簿

### 正 会 員

半 田 浩 一 (日産自動車)	田 中 智 之 (石川島播磨重工)	鹿 庭 政 人 (石川島播磨重工)
川 平 浩 司 (石川島播磨重工)	上 野 昌 明 (石川島播磨重工)	森 井 茂 夫 (石川島播磨重工)
黒 木 博 史 (石川島播磨重工)	及 川 和 喜 (石川島播磨重工)	大 場 茂 (石川島播磨重工)
船渡川 治 (石川島播磨重工)	福 嶋 光 穂 (石川島播磨重工)	大 野 隆 治 (石川島播磨重工)
永 淵 尚 之 (日立製作所)	住 川 雅 晴 (日立製作所)	大 屋 建 (本田技研)
小野寺 満 憲 (荏原製作所)	山 下 直 之 (関西電力)	西 村 孝 浩 (石川島播磨重工)
勝 田 直 (関西電力)	新 田 明 人 (財電力中央研究所)	磯 部 展 宏 (日立製作所)
檜 佐 彰 一 (東 芝)	澤 野 勝 彦 (A B B サービス)	

### 学生会員から正会員へ

木 島 基 博 (東京大学)

### 学生会員

佐 野 安 信 (武蔵工業)	松 浦 義 範 (武蔵工業)	永 田 公 秀 (東京理科学)
島 垣 満 (日本大学)	伊 東 春 彦 (東海大学)	

10. 株式会社日立製作所
11. 株式会社堀場製作所
12. 石川島播磨重工株式会社
13. 川崎重工株式会社
14. 光洋精工株式会社
15. 丸和電機株式会社
16. 三菱重工株式会社
17. 三菱製鋼株式会社
18. 三井造船株式会社
19. 株式会社ナック
20. 新エネルギー・産業技術総合開発機構
21. 株式会社新潟鉄工所
22. 日本ドナルドソン株式会社
23. 日産自動車株式会社
24. 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
25. 野崎産業株式会社
26. (財)石油産業活性化センター
27. ピーアイ・ポリテック株式会社
28. 株式会社先進材料利用ガスジェネレーター研究所
29. 三協インタナショナル株式会社
30. 新川電機株式会社
31. 進和テック株式会社
32. ソーラータービイズインコーポレーテッド
33. 日本マリンテクノ株式会社
34. タイヨーテクノ株式会社
35. 株式会社東芝
36. 日本ウッドワードガバナー株式会社
37. ヤンマーディーゼル株式会社

## 入 会 者 名 簿

### 正 会 員

半 田 浩 一 (日産自動車)	田 中 智 之 (石川島播磨重工)	鹿 庭 政 人 (石川島播磨重工)
川 平 浩 司 (石川島播磨重工)	上 野 昌 明 (石川島播磨重工)	森 井 茂 夫 (石川島播磨重工)
黒 木 博 史 (石川島播磨重工)	及 川 和 喜 (石川島播磨重工)	大 場 茂 (石川島播磨重工)
船渡川 治 (石川島播磨重工)	福 嶋 光 穂 (石川島播磨重工)	大 野 隆 治 (石川島播磨重工)
永 淵 尚 之 (日立製作所)	住 川 雅 晴 (日立製作所)	大 屋 建 (本田技研)
小野寺 満 憲 (荏原製作所)	山 下 直 之 (関西電力)	西 村 孝 浩 (石川島播磨重工)
勝 田 直 (関西電力)	新 田 明 人 (財電力中央研究所)	磯 部 展 宏 (日立製作所)
檜 佐 彰 一 (東 芝)	澤 野 勝 彦 (A B B サービス)	

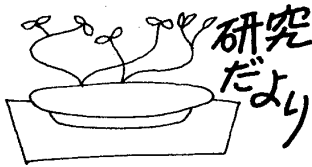
### 学生会員から正会員へ

木 島 基 博 (東京大学)

### 学生会員

佐 野 安 信 (武蔵工業)	松 浦 義 範 (武蔵工業)	永 田 公 秀 (東京理科学)
島 垣 満 (日本大学)	伊 東 春 彦 (東海大学)	





東京電力(株) 伊藤 洋 嗣

### はじめに

東京電力では、横浜市鶴見区の技術開発センターに、電力技術研究所、エネルギー・環境研究所、システム研究所、原子力研究所の4研究所を置き、100万V送電、シミュレータによる系統解析、耐震・耐雷、設備診断、電力貯蔵用ナトリウム硫黄電池、石炭ガス化複合発電、CO<sub>2</sub>分離除去、高速大容量通信、高速増殖炉、運転操作に関するヒューマンファクタ、その他の研究開発を行っている。

筆者が所属するエネルギー・環境研究所では、火力発電、燃料電池、電力貯蔵用電池等のエネルギー変換技術や地球環境技術の研究を担当しているが、この中でガスタービン関連の研究について紹介する。

### 1. ガスタービンへのセラミックス適用研究

高温高効率化のため、ガスタービンへのセラミックスの適用について研究を進めている。当初、TIT; 1300°Cのセラミックガスタービンの開発を目標に、燃焼器、静翼(初段・2段)、動翼(初段)に分けて研究を進めた(写真1, 2)。20MWサイズの各要素部品を窒化珪素材および炭化珪素材で試作し、動翼の回転試験を含めこれらをそれぞれ実温度の作動ガスを流して試験し、健全性を確認し、セラミックス適用の可能性を見出すことができた。

しかし、近年、金属翼のガスタービンの進歩が著しく、同温度レベルの大型ガスタービンが実用化され、当初の目標でのセラミックス適用の意義が失われたため、研究計画を見直し、現在は、より高温に適用可能なセラミック材料の探索・評価と適用技術的を絞って研究を進めている。

### 2. ガスタービン触媒燃焼器の開発

燃焼器での発生NO<sub>x</sub>を低減させるため、希薄な予混合ガスを触媒表面で緩やかに燃焼させる、

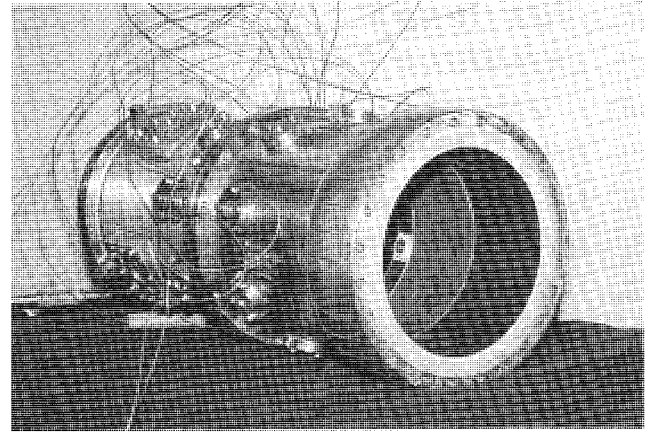


写真1 セラミック燃焼器

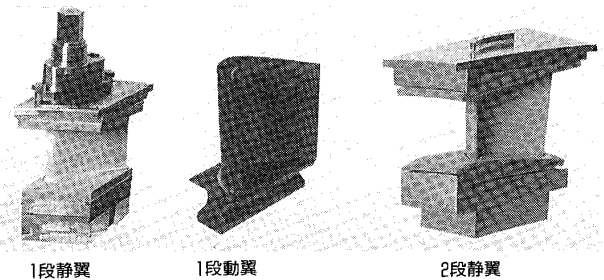


写真2 セラミック静翼と動翼

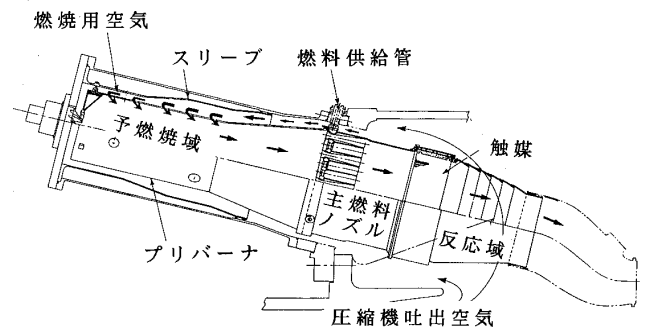


図1 触媒燃焼器構造図

触媒燃焼器の開発を進めている。触媒には、金属ハニカムに担持した貴金属触媒を用い、燃料は触媒の上流側で全量投入するが、触媒自体の過熱を抑制するため、ガスは反応途中で触媒を通過し、下流側の空間で燃焼を完結させる方式とした。

TIT; 1100°C級大型ガスタービンと同寸法の触媒燃焼器を試作し(図1)、実機と同条件で試験

(平成7年12月21日原稿受付)

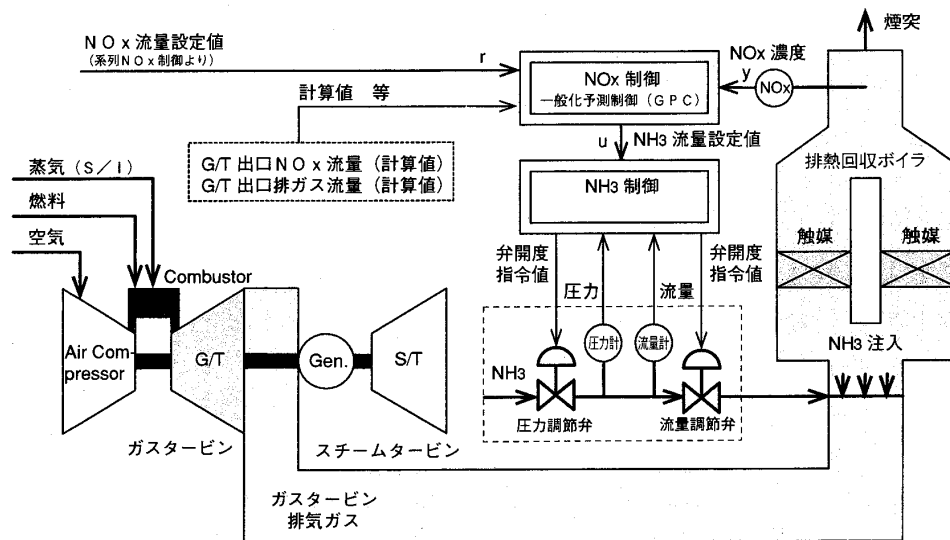


図2 排煙脱硝制御系統図

した結果、この方式の妥当性と、発生 NOx 濃度 10 ppm 以下を確認した。今後は、耐久性や安定運転範囲の拡大、より高い TIT への適用について研究を進める。

### 3. 排煙脱硝制御の改善

ガスタービンに設置している排煙脱硝装置は、フィードフォワードとフィードバックを組み合わせた方式でアンモニアの注入量を制御しているが、プラント出口 NOx 分析計の検出遅れや脱硝反応の非線形性のため、必ずしも制御性は良くない。このため、一般化予測値制御を応用した制御方式を開発し改善を試みた (図2)。

本方式による制御プログラムを実機の制御装置に組み込み試験を行った結果、負荷変動時のプラント出口 NOx ピーク値の抑制も含め、すべての運転領域で大幅な制御性の改善を確認できた。

### 4. 石炭ガス化複合発電技術の開発

石炭ガス化複合発電は、高効率で環境適合性の優れた石炭利用技術として期待されている。

実用機としての総合熱効率 43% を目指す技術開発の国家プロジェクトとして、空気吹き・ドライフィード方式の 200 t/d ガス化炉と、12.5 MW (TIT; 1260°C) のガスタービンを組み合わせた、パイロットプラント試験を実施した。これまでの試験で、ガス化炉は空気若くは酸素富化が必要となったものの、789 時間のガス化炉の連続運転と 253 時間のガスタービンとの組合せ運転に成功し、ガス化の効率も目標を達成した。

また、ガス化複合発電では、ガスの精製が重要なため、独自に、6t/d の酸素吹き・スラリーフィー

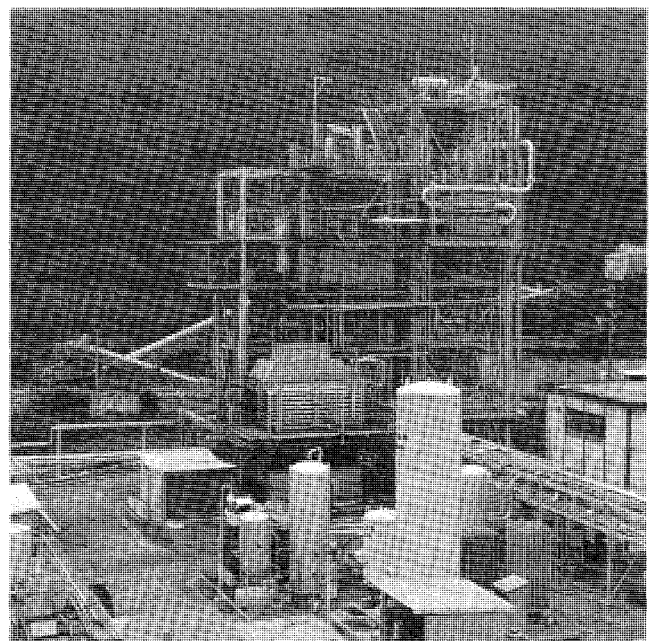


写真3 6t/d 石炭ガス化試験設備

ド方式の小型ガス化炉を設置し(写真3)、ガス化ガスを使って、乾式脱硫技術の研究を行っている。現在までに 95% の脱硫率を確認しているが、今後更に脱硫率の向上を目指して研究を進める。

### おわりに

東京電力では、コストダウン技術、安定供給技術、社会情勢変化対応技術、基盤技術を研究の柱としている。ガスタービンは、現代の火力発電の主力となっているコンバインドサイクルの主要な機器であり、コストダウンと環境調和のため、今後も高効率化と環境特性の改善の研究を続けていきたい。



## 「第21回 1995年 CIMACインターラーケン大会」 に参加して

日本内燃機関連合会 青木千明

1995年の5月15日(月)から18日(木)迄、スイス国インターラーケン市で第21回CIMAC大会が開催された。CIMAC (Conseil International des Machines a Combustion/International Council on Combustion Engines: 国際燃焼機関会議)では国際大会を隔年に開催しており、筆者は、CIMAC副会長及びガスタービン部門論文審査委員として大会に参加したので、ここに概要を御紹介したい。

### 1. CIMAC大会の概要

インターラーケンは、首都ベルンの南東にあり、チューリッヒからもジュネーブからも列車で2時間半程かかる名高い観光都市であって、日本人をはじめとする観光客が多い。ユングフラウ山を中心とするスイス・アルプスへの観光拠点であり、好天時には町の正面真南に白雪を抱いた見事なユングフラウ山を望むことができる景勝地である。大会会場は、市街地のほぼ中央にある“CASINO-KURSAAL CONGRESS CENTER”で、町中央の大公園の相向いにあって、入口ゲイトと建物の間にはきれいな花壇と噴水の庭園があり、ユングフラウ山を背景にした見事な景観を楽しむ(写真1)。

大会は、月曜から木曜迄の4日間にわたり講演会及びパネル討論やワークショップなどが行われ、また翌19日(金)にはCIMAC主催の見学会(ABB

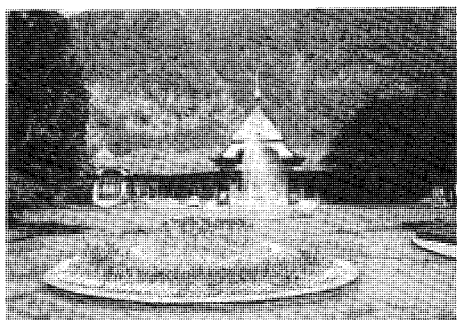


写真1 大会会場の歴史を感じる建物と庭園

(平成7年12月8日原稿受付)

社Baden/Birr工場, DUAP社とスイス工科大学(ETH), Sulzerフランス社の3コース)が行われた。

大会参加者は24か国から同伴者80名を含め総計約550名におよび、国別には1位がドイツ(登録者69名+同伴者10名=79名)で、次いで日本(67+3=70)、スイス(59+17=76)、イギリス(59+10=69)、デンマーク(29+14=43)の順であった。

発表論文数は、ピストンエンジン部門(PE)とガスタービン部門(GT)及びFISITAセッションならびにワーキング・グループ報告(WG)も合わせて、19か国から総計112編(PE: 80, FISITA: 7, WG: 7, GT: 18)であり、計35セッション(PE: 27, FISITA: 2, GT: 6)で発表された。ターボ過給機関係は、ピストンエンジン部門の中のPE/GT共通セッションとして2セッションで6編(内数)の論文が発表された。日本からの論文は計32編(PE: 24(30%), FISITA: 2(29%), GT: 6(33%))と、全体の29%を占めた。また、高木誠司日本内燃機関連合会会長が「日本及び極東における内燃機関の発展と将来展望」という基調講演をされ、「技術の展望」のパネル討論には、筆者がガスタービン関係のパネリストとして「高効率化に挑戦する将来ガスタービンでの最新技術開発の展望」と題して話題提供を行った。

このように日本の貢献度は高く、また各国から多数の参加者を得て、盛況の中で国際交流を深めながら、大会は成功をおさめることができた。

### 2. 論文の動向

ガスタービン部門の講演は、主会場ではなく大会本部をおいたホテル・ビクトリア・ユングフラウ内の会議場で行われた(写真2)。

ガスタービン部門での論文発表数はCIMAC論文が16編(うち1は口頭発表のみ)、ASMEの招待論文が2編あり、合計18編の論文が6セッションで発表された(うちASME1は発表取り止

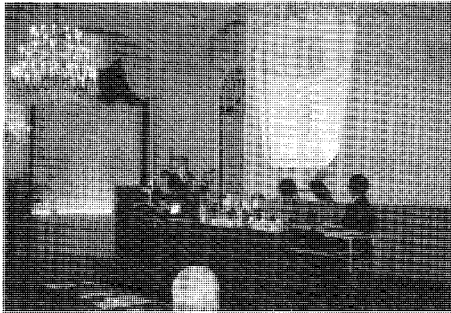


写真2 講演会場（講演者は石谷清幹先生）

め)。さらに、パネル討論が1つ行われた。

国別の発表論文数は、日本が6編(38%/全体の33%)、スイスが5編(うち口頭発表1, ASME 2), スウェーデンが2編, ノルウェー, オーストリー, オランダ, イギリス, アメリカが各1編であった。ターボ過給機関係は、6編中日本, スイスが各2編, ドイツ, イギリスが各1編であった。国別では最近では日本がトップを続けている。

技術領域別の発表論文数は、新機種開発が4編(うちASME 1, 日本1), 数値解析・設計及び将来技術が3編(うち日本2), 高温ガスタービン及び運転実績が3編(うちASME 1, 日本2), 燃焼及び排気ガス成分制御が3編, 将来のガスタービン・システムが3編(うち日本1), 診断・修理が2編で、さらに高速船用推進機関選定のパネルがあり5名のパネリストが参加した。

最近の大会ではいつもトップを占めていた燃焼関係が今回はやや減少し、新機種・将来技術関係が増えたことは興味深い。

日本からの発表論文は次の通りで、内容的にもいずれもよく充実したものであった。

- ・川崎重工-浜平他「産業用高効率6 MW ガスタービンの開発」
- ・石川島播磨重工-田頭他「セラミックスのガスタービン翼への適用」
- ・石川島播磨重工-小幡「蒸気冷却翼での湿り度の影響に関する解析的研究」
- ・三菱重工/東北電力-富田他「コンバインドサイクル用高温ガスタービンでの主要技術開発」
- ・日立製作/JR 東日本-和田他「JR 東日本川崎発電所の増設コンバインドサイクルと運転実績」
- ・大阪大学/平川鉄工所-石谷他「加熱管群を持つ

第2世代 JAFI 燃焼器のガスタービン適用」ターボ過給機関係は次の通りである。

- ・三菱重工-松尾他「大形ディーゼル機関用鋼製圧縮機羽根車の MET-SH 型ターボ過給機」
- ・三菱重工-御子神他「高速船用ディーゼル機関用高効率ターボ過給機の開発」

ガスタービン部門最優秀論文賞は、田頭他による日本の論文が、内容の充実性と共に技術成果が今後世界的に設計的利用可能なことが評価され決定した。前回に続いて日本が受賞し(7回のうちガスタービン部門では日本が4回受賞), 大会最終日の晩餐会の席上で CIMAC 会長から表彰されたことは非常に喜ばしいことであった。

### 3. CIMAC ツアーと関係機関視察

日本内燃機関連合会が企画した“CIMAC ツアー”は、団長に内海博先生(東京商船大学名誉教授), 副団長に佐藤豪先生(慶応義塾大学名誉教授)をお願いし、46名の参加者を得てこれに同伴者2名と添乗員1名を加えて合計49名が参加した。Aコースが大会と大会後の視察旅行(24名), Bコースが大会中心の自由行動コース(25名)であった。

Aコースの後半は、オーストリー第2の都市グラーツにある AVL-LIST 社研究所(22日(月)), スウェーデンのストックホルム南方のフィンスポンにある ABB-STAL 社ガスタービン工場(24日(水)), さらにイギリスのロンドン南方のショアハム・バイ・シーにある RICARDO CONSULTING ENGINEERS 社研究所(25日(木))とバーミンガム北方のスタフォードにある PERKINS (STAFFORD) 社ディーゼル機関工場(26日(金))を訪問して視察を行った。

実り多くかつ思い出深い視察となり、訪問先の誠意ある対応の賜物として感謝にたえない。

### 4. 結言

今回の CIMAC 大会は、きわめて成功裡に終えることができた。これも一つには、論文提出、講演発表、大会やツアーへの参加等で御協力頂いた多くの皆様のおかげであり、深く感謝いたします。

次の大会は、3年後の1998年5月18~21日にデンマークのコペンハーゲンで開催を予定しており、多くのご参加を今から期待している。



## 「超音速輸送機用推進システムの研究開発」 第2回国際シンポジウム

超音速輸送機用推進システム技術研究組合 村島完治

1992年に開催された第1回に引き続き、第2回の超音速輸送機用推進システムの研究開発(HYPRプロジェクトと略称される)の国際シンポジウムが去る10月19-20日に前回と同じ東京のTEPIAホールで開催された。

このシンポジウムは通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度により推進されている国家プロジェクトとして、飛行マッハ5クラスの極超音速輸送機用の推進システムに必要な技術を取得する目的で、1989年度から10年計画で進められている研究のこれまでの成果と現状を発表するために開かれた。

シンポジウムは2日間にわたり1会場で行われ、特別講演2件を含む合計30件の発表が日英同時通訳付きで行われた。特別講演は、米国およびヨーロッパに於ける第2世代のSSTに関する計画の現状についてそれぞれNASA本部のMr. WilliamsおよびBritish AerospaceのMr. Grayにより行われ、実用化へのキーとして、経済性と環境対応(エンジンでは汚染物質排出と排気騒音)を挙げ、研究の進捗状況から見て21世紀初頭には実用化開発を始動できる技術的見通しが得られて

いることが述べられた。

一般研究発表では、このHYPRプロジェクトに参加している国内のエンジンメーカー3社のIHI, KHI, MHI, 国外の世界トップのエンジンメーカーである米国GE, UTC, 英国のRR, 仏国のSNECMAからの発表や、航空宇宙技術研究所を中心とする国立研究機関からの発表も行われ、エンジン本体のみならず、インテークや排気ノズルを含めた各要素に関する基礎および応用研究から、エンジンシステム研究としてのサブスケール試作エンジンの運転試験まで広範囲の研究状況がほぼ計画通りに進捗して、成果が挙げられている旨報告された。

トピックスとしては、飛行マッハ5クラスの環境でのラム燃焼器のシミュレーション試験が終了し、エンジンの詳細設計へと進んでいることが報告され、ターボエンジンの燃焼器ではNO<sub>x</sub>排出が燃焼燃料1kg当たり5gの目標をクリアできる実験データが紹介され、またエンジン排気騒音の低減では、ミキサエジェクタ方式により推力低下7%レベルで13dB以上の低減が可能との試験成果が報告された。



写真1 シンポジウム会場風景



写真2 休憩時間の会場ロビー

(平成7年12月14日原稿受付)

一方、試作エンジンでは、ターボコアエンジンで高速飛行時をシミュレートして吸入空気を加熱した運転で、タービン入口温度 1600°C レベルの試験が開始され、またターボエンジンでは我が国初の可変サイクル形式のターボファンエンジンとして、その最初の地上運転で計画最大出力に到達したことが報告された。

このシンポジウムの参加者は第1日は210名を数え、定員240名の会場が殆ど満席状態で熱心に聴講・討議がなされた。また、シンポジウムホール前のロビーにはHYPRエンジンの全体模型、

およびエンジン実機部品のファン、圧縮機、タービン翼、燃焼器などを組み入れた試作エンジンの原寸大カットモデル、更に各要素研究の状況の写真パネルが展示され、休憩時間にはその前に大勢の人が立って議論が行われていた。

欧米にて次第に期待が高まって来つつある次期超音速輸送機の実用化開発を見通して、本研究の成果が今後のSST/HSTの国際共同事業への大きな足がかりとなることを参加者や関係者に実感させたシンポジウムであった。



伝言板 9603A

### PSFVIP-1 開催のお知らせ

The 1st Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (略称: PSFVIP-1)が来年2月にハワイにて開催されます。扱う内容は可視化に関連した幅広い領域で、流れの可視化およびそれに基づく計測法のみならず、様々な物理量の可視化、種々のデータの画像表示、デジタル画像処理、その他関連する可視化手法の基本原理からその応用までを含みます。研究者同士のホットな情報交換をハワイにて満喫出来る機会ですので、ふるって論文を投稿・発表下さいますようお願い致します。

- ・開催期日: 1997年2月2日~7日
- ・開催場所: Honolulu, Hawaii, USA
- ・論文募集範囲: Flow-Field Visualization, Surface Flow Visualization, Computer-Assisted Flow Visualization, Graphical Display of Data Sets, Digital Image Processing and Others.
- ・アブストラクト期限: 1996年5月1日
- ・原稿期限: 1996年8月15日
- ・詳細は以下にお問い合わせ下さい。

〒184 東京都小金井市中町2-24-16

東京農工大学 工学部 機械システム工学科 教授 望月貞成

TEL/FAX: 0423-88-7088 E-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp

ホームページ: <http://www.cc.tuat.ac.jp/~psfvip-1/>

- ・送 信 者: 望月貞成 (東京農工大学) TEL/FAX: 0423-88-7088

一方、試作エンジンでは、ターボコアエンジンで高速飛行時をシミュレートして吸入空気を加熱した運転で、タービン入口温度 1600°C レベルの試験が開始され、またターボエンジンでは我が国初の可変サイクル形式のターボファンエンジンとして、その最初の地上運転で計画最大出力に到達したことが報告された。

このシンポジウムの参加者は第1日は210名を数え、定員240名の会場が殆ど満席状態で熱心に聴講・討議がなされた。また、シンポジウムホール前のロビーにはHYPRエンジンの全体模型、

およびエンジン実機部品のファン、圧縮機、タービン翼、燃焼器などを組み入れた試作エンジンの原寸大カットモデル、更に各要素研究の状況の写真パネルが展示され、休憩時間にはその前に大勢の人が立って議論が行われていた。

欧米にて次第に期待が高まって来つつある次期超音速輸送機の実用化開発を見通して、本研究の成果が今後のSST/HSTの国際共同事業への大きな足がかりとなることを参加者や関係者に実感させたシンポジウムであった。



伝言板 9603A

### PSFVIP-1 開催のお知らせ

The 1st Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (略称: PSFVIP-1)が来年2月にハワイにて開催されます。扱う内容は可視化に関連した幅広い領域で、流れの可視化およびそれに基づく計測法のみならず、様々な物理量の可視化、種々のデータの画像表示、デジタル画像処理、その他関連する可視化手法の基本原理からその応用までを含みます。研究者同士のホットな情報交換をハワイにて満喫出来る機会ですので、ふるって論文を投稿・発表下さいますようお願い致します。

- ・開催期日: 1997年2月2日~7日
- ・開催場所: Honolulu, Hawaii, USA
- ・論文募集範囲: Flow-Field Visualization, Surface Flow Visualization, Computer-Assisted Flow Visualization, Graphical Display of Data Sets, Digital Image Processing and Others.
- ・アブストラクト期限: 1996年5月1日
- ・原稿期限: 1996年8月15日
- ・詳細は以下にお問い合わせ下さい。

〒184 東京都小金井市中町2-24-16

東京農工大学 工学部 機械システム工学科 教授 望月貞成

TEL/FAX: 0423-88-7088 E-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp

ホームページ: <http://www.cc.tuat.ac.jp/~psfvip-1/>

- ・送 信 者: 望月貞成 (東京農工大学) TEL/FAX: 0423-88-7088



## 米国エネルギー省(DOE)コントラクターズ会議

財団法人自動車研究所 中 沢 則 雄\*

DOE はエネルギーに関する各種施策の一環として、自動車に対する新技術の開発を推進している。その目的は、近い将来に予想される新たなエネルギー危機に備え、国内石油需要の海外からの輸入への依存率(現状46%)の大巾低減を図るため、自動車の燃費向上および代替燃料化と、加えて環境保全のための排出ガスのクリーン化である。民間の企業、研究機関および大学がDOEと契約し、政府資金を得て各種開発テーマに取り組んでいる。

本会議の正式名称は、“Automotive Technology Development Contractors’ Cordination Meeting”(略称CCM)であり、DOEが毎年10月下旬にデトロイトの郊外のデアボーンで開催し上述の開発基本方針と全体計画および予算、個々の開発テーマの進捗と成果が報告される。DOEが進める一連の開発は1970年代中頃からスタートし、当初はスターリングエンジン、セラミック材料、セラミックガスタービン(CGT)、断熱エンジンが主要な開発テーマであったが、最近では電気ハイブリッド車、代替燃料利用技術の開発に重点が置かれており年間予算は約2.2億ドルで開発費補助率は、開発テーマと受託先によって50~100%の内で異なるものと推定される。

本会議には例年日本からも国際的情報交換の一環として、通産省のCGTプロジェクトの現況を報告しており、今年も100kW自動車用CGTについては石油産業活性化センター丹羽常務理事と筆者から、300kW産業用CGTについてはNEDO代理として機械技術研究所内山氏より発表した。同様に欧州共同開発の自動車用CGTプロジェクトについても報告されている。今年も会議期間が10月23日~27日、出席者約500人、セッション数13、ワークショップ1、発表件数約100であった。米政府が自動車メーカーのピック3

とパートナーを組み乗用車の燃費向上3倍を目標とするPNGV(The Partnership for a New Generation Vehicle)計画が既に進められており、その中で重点開発技術として取り上げられている、電気ハイブリッドシステムと燃料電池のセッションが今回の会議でも最も出席者が多く、活発な討議が行われていた。電気ハイブリッドシステムの動力源の有力候補の一つとしてCGTの開発が進められている。

DOEとその前身の機関による自動車用CGTの開発は1970年代にスタートとしたCATE(Ceramic Application in Turbine Engines)とAGT(Advanced Gas Turbine)プロジェクトにさかのぼる。その後ATTAP(Advanced Turbine Technology Application Project)に引継がれ、現在は電気ハイブリッド車用動力源の開発として、CGTは位置付けされている。

電気ハイブリッド車はGMとフォードが開発の主契約会社であり、PNGV計画の中の第一段階として1998年迄に現用の乗用車クラスの燃費向上2倍を試作車で実証する目標を掲げており、動力源としてガスタービンとスターリングおよびディーゼルエンジンを併行開発する。また動力源とともにエネルギー蓄積および車両システムと電気機器の新技術に取り組む方針。ガスタービン動力源の開発については、GMとはアリソンが契約し、フォードとはアライドシグナルおよびテレダインが契約交渉中であり、そのCGT技術開発をNASAが全体を取りまとめて推進して、セラミック部品の設計、製造、評価法等の実用化のための技術向上を図っている。CGTの開発状況は下記の通りである。

### (1) GMハイブリッド車用のCGT/アリソン

図1に展示されたモックアップを示す。ATTAP計画でのCGT要素技術開発のテストベッドであったAGT-5(2軸式、遠心圧縮機1段+軸流タービン3段)をスケールダウンした高速

(平成7年12月27日原稿受付)

\*三菱自動車工業(株)



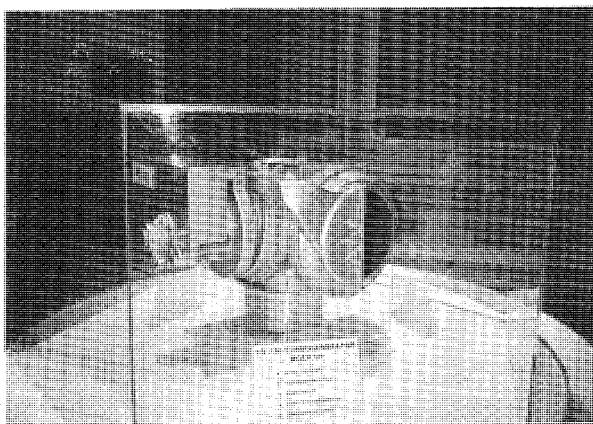


図1 ハイブリッド車用CGTモックアップ  
(アリソン)

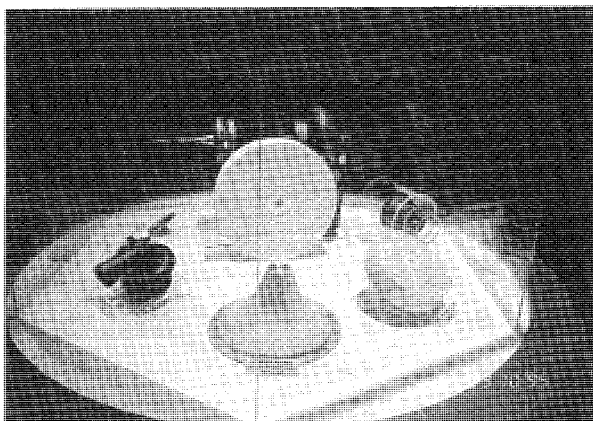


図2 CGT要素開発部品  
(アリソン)

発電機と直結する出力60kWの1軸式と考えられ、2ヶの回転蓄熱式熱交換器を持っている。タービンと燃焼器のセラミック部品は最初の試作品がメーカーで完成しており、一方金属タービン仕様のエンジンはベンチテスト中で、車載テストも近々スタートする模様。

#### (2) CGT要素技術開発/アリソン

AGT-5のセラミック部品、燃焼器、回転蓄熱式熱交換器、断熱材(図2)の開発を、ATAAP計画を引継ぎ進めており、(1)のCGT開発に反映している。ATAAP計画時の軸流タービンの1400°Cレベルの耐久テスト以降めざましい進展は見られないが、熱交換器用低コストの押し出し成形のセラミックハニカム蓄熱コアのガス温度940°Cレベルのリグテストを進めている。

#### (3) セラミック部品の実証/アライドシグナル 航空機搭載の補助動力ガスタービン (APU) で

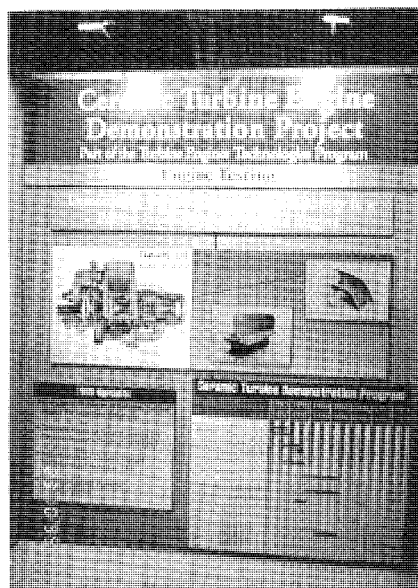


図3 セラミックノズルとブレード  
(アライドシグナル)

ある出力550hpクラスのモデル331-200(遠心圧縮機2段+3段軸流タービン)の第1段ノズルと植込みブレードをセラミック化し、実用性をデモンストレーションするのが開発の目標(図3)。ノズルは既に約900hr、2500始動の運転実績が得られているが、ブレードは共振破損と植込み部ダブテールの信頼性不足の対策を実施している。エンジンベンチでの耐久テストと、市場エンジンへの組み込みによる実用性評価を1998年迄に実施する計画。

#### (4) セラミック部品の製造技術開発

上述の(1)~(3)開発にタービン、燃焼器部品を供給するとともに、低コスト量産技術の開発を進めている(アライドシグナルセラミックコンポーネント、京セラインダストリアルセラミック)。特に(2)の実用エンジン部品は、生産規模、歩留、コストに目標を設定し実験工場を作る計画。熱交換器用低熱膨張率の酸化物系セラミックハニカムコアについては、外径280mmの一体押し出し成形手法による低コスト化技術を開発中(コーニング)。

なお、日本のCGTプロジェクトについては、セラミックコンポーネント評価、エンジン性能等について具体的な実験データをベースに報告し、参加者の高い評価を得たほか、今後の相互の開発推進のための貴重な技術交流の場とすることができた。



# ラムジェットエンジン試験設備と 極超音速エンジン試験

航空宇宙技術研究所 三谷 徹  
// 八柳 信之

## 1. はじめに

スペースシャトルに替る宇宙への輸送システムとして、空気吸込み式エンジンを利用した水平離着陸型の宇宙往還機の検討が進められている。一方2020年から2030年頃には大陸間をマッハ5で飛行する極超音速輸送機(HST)の実用化が予想されている。

その飛行速度では回転式コンプレッサで空気を圧縮することは不可能で、飛行動圧のみで空気を圧縮する新しい型のエンジン、ラムジェットエンジンが必要となる。そのラムジェットには吸込んだ空気を亜音速まで減速して燃焼させるラムジェット(ramjet)と、超音速のまま燃焼させるスクラム(Supersonic Combustion RAMjet: SCRAMと略称する)ジェットエンジンがあり、それらの開発が21世紀に向けて急がれている。

このような超音速飛行用エンジンを研究し、その性能を確認するためには、飛行マッハ数と飛行高度を模擬できるエンジン風洞が必要となる。そこで航空宇宙技術研究所では、角田研究センタにラムジェットエンジン試験設備(RamJet engine

Test Facility: RJTF)を完成し、1994年から運用を始めた。この風洞は、地上で高度20kmでのマッハ4から、高度35kmのマッハ8飛行状態に相当する気流を作り、その中でエンジンを試験するものである。

表1に設備の主な仕様をまとめた。表から分かるように、それらの条件を満たすために気流総温は最高2600Kまで、圧力は10MPaまで上げる必要がある。最大空気流量は46.9kg/s(M4時)で、高度を模擬するために低圧室は最も低い時で1/70気圧まで減圧される。

現在までにこのRJTFを用いて、マッハ4から8条件下での無冷却および水冷スクラムジェットエンジンの燃焼試験(計63回)を実施した。またマッハ5旅客機用に計21回のラムジェット燃焼試験を実施してきた。ここではこの風洞設備とエンジン試験の概要について紹介する。

## 2. RJTF 設備の構成

ラムジェットエンジン試験設備の鳥観図を図1に示す。23MPaの高圧空気は図右の圧縮機棟から供給され、図中央の2本のair tankに蓄えられ

表1 設備仕様

Flight condition				
Mach number	8	6	4	
altitude	35 km	25 km	20 km	
Facility condition				
heater	SAH+VAH	VAH	SAH	SAH
total temperature	2600 K	1660K	1580 K	872 K
total pressure	10.0 MPa	4.78 MPa	5.25 MPa	0.86 MPa
air flow rate	6.12kg/s	23.7 kg/s	29.8 kg/s	45.9 kg/s
O <sub>2</sub> flowrate	2.16kg/s	5.44kg/s	—	—
H <sub>2</sub> flowrate	0.181kg/s	0.446kg/s	—	—
Engine inlet condition				
Mach number	6.73	5.30	3.41	
static temperature	324 K	275 K	274 K	
static pressure	1.6kPa	5.3kPa	12.3kPa	
Maximum run time	30 sec	60 sec	60 sec	60 sec

(平成8年1月22日原稿受付)

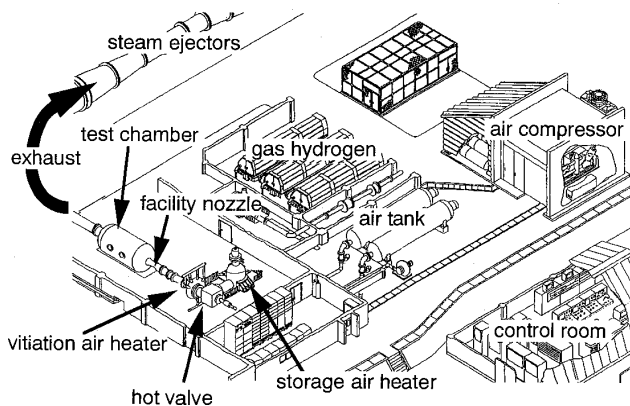


図1 ラムジェットエンジン試験設備の鳥観図：  
供試エンジンは図左中央の直径 3000 mm，長さ 6000 mm の tent chamber 内に据え付けられる。

る。実験時には図中央試験棟内の蓄熱体加熱器 (Storage Air Heater: SAH) により空気は最高 1600 K まで昇温される。SAH の加熱には LPG バーナを用いる。

その高温高压空気の供給および停止には、図左下に示す高温弁 (hot valve) を使用する。高温弁によって直角に曲げられた空気流は直下流のバイパス空気混合器，高温配管を通り，整流洞へと流れる。M8 試験時には整流洞の上流に燃焼加熱器 (Vitiation Air Heater: VAH) を配置する。

高温高压空気は整流洞から低圧室に接続したノズルに導かれる。この寸法 510 mm × 510 mm の正方形ノズルから低圧室 (test chamber) 内に吹き出す自由噴流中でエンジンの性能が測定される。エンジンからの排気とノズル流は，高空性能試験設備 (HATS) の 2 段蒸気エジェクタにより排気して，低圧室を規定高度環境に模擬する。

エンジンと燃焼加熱器用のガス水素は図中央の水素ガストレーラから供給される。また建屋反対側 (図では左下) には燃焼加熱器用高压酸素気蓄器，高压冷却水タンクとその加圧用窒素タンク，エンジン冷却用液体水素ランタンクを配置した。

### 2.1 蓄熱体加熱器 (Storage Air Heater: SAH)

蓄熱体加熱器は直径 1776 mm，高さ 9905 mm の圧力容器で，内部に耐熱レンガ層を経て，直径 1124 mm，高さ 6096 mm に純粋アルミナ製コアドブリックが積まれている。このコアドブリックを積み上げた蓄熱体ベッドには直径 7 mm，総計 5579 個の上下に貫通した穴がある。その穴を通っ

て，蓄熱時には蓄熱体加熱器の上部に設置されている LPG バーナからの高温燃焼ガスが上から下へ，風洞運転時には空気は下から上に流れ，熱交換を行う。

### 2.2 高温弁とバイパス空気混合器

蓄熱体加熱器の下流には油圧駆動型高温弁が接続される。高温弁前後に大きな差圧があると，弁の開閉時に局所的に熱流束が高くなる。これを避けるために，高温弁操作の前に高温弁の下流にあるバイパス空気混合器から多量の空気を供給し，下流側圧力と上流側圧力とを均圧させた後，弁の開閉動作に入る。

### 2.3 燃焼加熱器 (Vitiation Air Heater: VAH)

M8 条件では空気を 2600 K まで加熱するために，VAH を併用する。燃焼により生成された  $H_2O$  はラジカルの失活反応を促進するため，燃焼模擬空気の使用はエンジンの燃焼性能に影響する可能性がある。このため，M6 試験条件において SAH と VAH とのエンジン試験を比較し， $H_2O$  の影響を予め調べた上で M8 試験を実施する。従って RJTF には常温空気に水素と酸素を加えて燃焼させる M6 用 VAH と，予熱空気に水素と酸素を加えて燃焼させる M8 用 VAH の 2 種類の VAH を用意した。

### 2.4 M4, M6 および M8 ノズル

スクラムジェットエンジンは機体組込みに合せて矩形となり，機体で発達した境界層を吸込む。そこで境界層吸込みを模擬するために，ノズル断面を 510 mm 正方形とした。RJTF の使用する 3 個のノズルの内，M4 ノズルと M6 ノズルは 2 次元で，M8 ノズルは全長にわたって断面が正方形の 3 次元ノズルで，その全長は 2200 mm (M4) から 3639 mm (M8) である。

M4 ノズルは積極的な冷却はせずヒートシンク方式とし，流路面にニッケルメッキを施した鋼で製作した。M6 ノズルでは熱流束の高い収縮・スロート部のみ熱伝導率が高く，疲労強度に優れたジルコニア銅の一体構造とし，放電加工により成形した。M8 ノズルは収縮・スロート・第 1 膨張部のみをジルコニア銅の水冷却造とし，その下流の膨張部をニッケルメッキをした鋼板を溶接して製作した。

## 2.5 低圧室と空気排気系設備

低圧室は直径 3,000 mm, 平行部長 5,100 mm の円筒形で, この中の推力架台の上にエンジンが据え付けられる。ノズルの下流には可視化のためにスリットを入れた水冷ディフューザ・エクステンションを取り付けた。

低圧室の排気は既設 HATS の 2 段蒸気駆動エジェクタによって行う。空気圧縮器能力, 気蓄器容量, SAH の熱容量, 蒸気ボイラ能力, およびアキュムレータ容量から RJTF の実験頻度は 1 日 1 回, 週 4 回となっている。

## 2.6 計測系設備

RJTF には低圧室に推力架台 (FMS) が設置されており, エンジンの発生する推力と揚力, およびピッチングモーメントを測定する。そのため推力方向には較正用を入れて 1 組の, 上下方向を 3 組のロードセルで揺動台を支えている。FMS に取り付けられるエンジンの質量は最大 400 kg である。なおロードセルを較正するために, FMS は油圧アクチュエータによる内部較正機構とロック装置を内蔵している。

常時計測用に 141 CH の A/D 変換器と高周波計測用に 7 CH のアナログ収録装置, そしてエンジン壁圧用に 10 台の多点圧力スキャナ (PSI 製) を用いて 160 CH の圧力データを収録する。エンジン周りの流れ場の観察のため, 500 mm シュリーレン装置を設置した。

## 3. エンジン燃焼試験

### 3.1 スクラムジェットエンジン試験

1995 年 10 月までに無冷却スクラムジェットエ

ンジンを使用した M4 と M6 飛行条件試験と水冷エンジンを用いた M8 試験の計 63 回のエンジン燃焼試験を実施した。

図 2 に供試エンジンの概念図を示す。供試エンジンは圧縮機等の回転部分がなく, 機体組込みを考慮して矩形断面となっている。インレット流路の最大正面投影面積は 200 mm×250 mm, 全長は 2,100 mm で, 想定される実機の約 1/10 縮尺エンジンである。インレットは半頂角 6° の楔による側板圧縮型 (後退角 45° 付き) である。インレットの断面収縮比はストラットを付けない場合 3 である。

空気取入口出口から一定断面積部 (燃焼の影響の遡りを防ぐための分離部) を 100 mm 取った後, 水素火炎を保炎するために側板に 4 mm, 天板に 2 mm の後向きステップを設けた。燃焼器内の代表圧力は M6 試験時で 20 kPa と低く, 流速は 1500 m/s を越える。水素噴射孔はステップ上流のパイロット, ステップ面の主平行, 及びステップ下流の主垂直の 3 列からなっており, 使用する列を選択できる。点火には天板に設置した 2 個の酸素作動プラズマ (PJ) トーチを用いている。

図 3 に M6 S 条件で実施した推力 1100 N を発生している時のエンジン試験状況を示した。写真の左手が設備ノズルで, エンジンインレット入口でマッハ数 5.4 流れの中にエンジンは上下逆に FMS に据え付けられている。画面左に 45 度後退角のインレットが, 画面中央にカウルが位置している。写真右手のエンジンノズルから水素燃焼による輝炎が見える。またエンジン内部流は始動状態であるが, カウルからも燃焼ガスのスピルが見

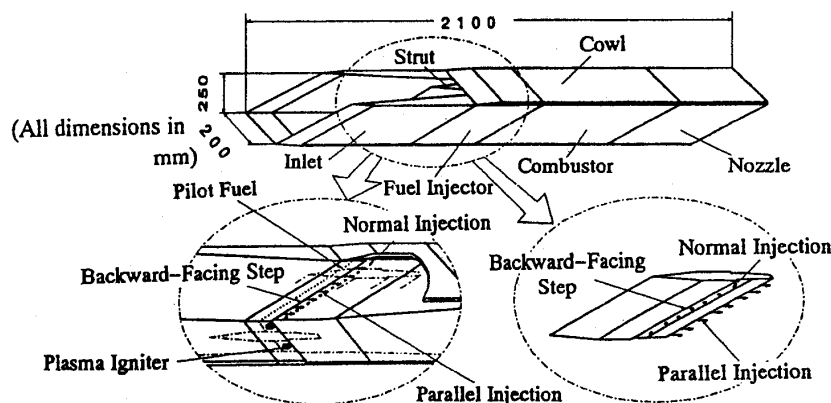


図 2 側板圧縮型供試スクラムジェットエンジンの概念図:

後ろ向きステップ付き燃焼器と燃料噴射ストラット部の詳細を図の下に示す。

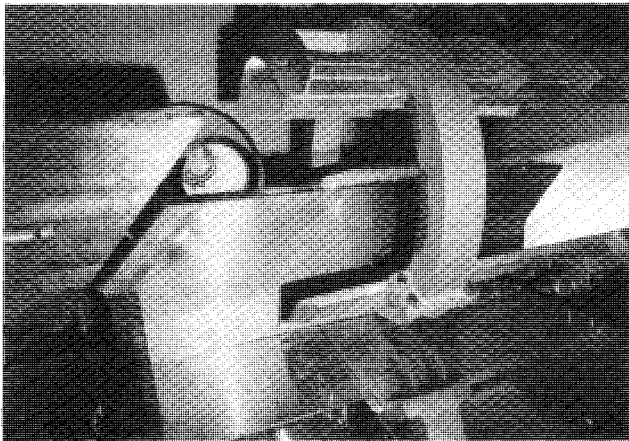


図3 水素燃料のスクラムジェットエンジン燃焼試験：M5.4 空気流は左の設備ノズルより供試エンジンに供給されている。エンジンは図2に示すように上下逆に推力台にとりつけられており、エンジンノズルから水素火炎が噴出しているのが見える。

える。

### 3.2 ラムジェットエンジン試験

マッハ数5で飛行する超音速旅客機のための新しい型のジェットエンジンが、通産省・工技院のプロジェクトとして超音速輸送機用推進システム技術研究組合が中心となり進められている。このエンジンはメタンを燃料とし、マッハ3まで加速するターボジェットとマッハ5までの推進に適したラムジェットを組み合わせたコンバインドサイクルエンジンと呼ばれるもので、そのラムジェット部の燃焼試験がRJTFを用いて実施された。

試験は図4に示すような幅180mm、高さ220mm、長さ2150mmの実機想定エンジンの約1/10縮尺のラムジェットエンジン部について行った。このエンジンは写真左下から流れてきたマッハ5の気流をインレットランプにより圧縮し、インレットスロートに押込む。圧力比約160まで圧縮された空気はその下流のディフューザで亜音速まで減速され、そこにメタンが噴射保炎される。写真ではインレット側壁の楕円型の可視化窓、フェアリングを外した状態の燃焼器とその下流の2次元ノズルが見える。これまでに11回の燃焼実験を

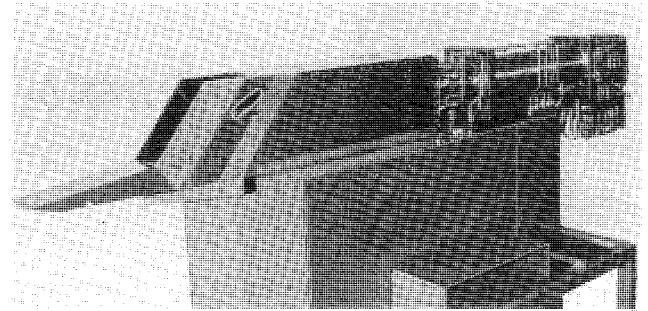


図4 メタン燃料のランズ圧縮型供試ラムジェットエンジン：空気は左下からインレットでラム圧縮される。インレット後部の可視化用の窓、またフェアリングを取り外して燃焼器と2次元ノズル部を示す。(川崎重工(株)提供)

実施し、最高2200Kの燃焼温度を確認している。

### 4. まとめに代えて

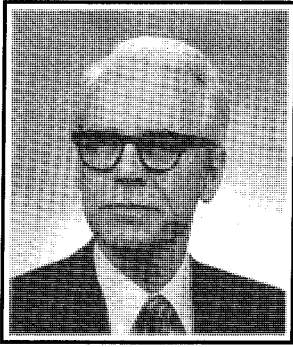
RJTFの試験には供試体準備に加えて、前日からの蓄熱体加熱器の加熱、排気系の蒸気立ち上げ操作、制御計測等多くの手順が必要である。一方RJTFの試験頻度は1日1回、週4回で、その試験時間は最大60秒(M4およびM6条件)から30秒(M8条件)と制限されている。

このようにエンジン風洞試験には多くの人手と費用が掛かり、その実験には多くの制約がある。しかしその風洞試験技術は航空機用エンジンの開発を支える基盤技術である。RJTFは我が国初の極超音速エンジン風洞であり、建設と運転に際し多くの困難に遭遇したが、今後ともエンジン風洞試験法の確立のため努力して行く所存である。

なお設備の建設は神戸製鋼(株)が担当した。スクラムジェットエンジン試験は三菱重工、点火トーチは石川島播磨重工の協力を得た。ラムジェットエンジン試験はHYPR組合(担当:川崎重工)との共同研究として行った。建設およびエンジン試験に参加した方々に謝意を表す。

### 参考文献

- (1) 宮島ほか: ラムジェットエンジン試験設備の建設, 航空宇宙技術研究所報告, 出版予定, 1996.



追悼

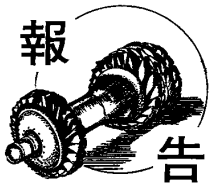
## 我が懐かしのジャックソーヤー

浜井産業(株) 佐藤 玉太郎

トムソーヤーとジャックソーヤー、この二人のソーヤーの名を懐かしさと感慨を以て思い出す古参会員の方も多い事でしょう。私もその一人です。お二人は昭和40年代当時ASMEガスタービン部会の幹部として日本のガスタービン界の研究者や技術者に呼びかけて1971年に初の東京ガスタービン会議を共催し、それがきっかけとなって今日の日本ガスタービン学会の創設につながった訳です。もちろんこの事が無くともガスタービンの学会は早晚作られたことではと思いますが、今の日本ガスタービン学会とは違う形になっていた筈です。その意味でお二人は本会の創設のきっかけを作られた人達とも言えると思います。そのトムソーヤー氏も約10年前に死去し、今またジャックが昨年3月20日に死亡されていたことを半年も後になってASMEのガスタービンニュースに掲載されていたことに気がきました。なんとも迂闊なことを大変悔やみましたが、何はともあれお悔み状を夫人に発送するとともに本誌に訃報を出させて頂く事になった次第です。ジャックは私の記憶によれば大学では電気工学を専攻したそうですが、卒業後の1930年代には船舶技術者としてスタートし、戦時中の1943年から70年にかけて米国海軍に在籍され船用ガスタービンの研究開発に従事されました。その間9つの特許を出願し、またSawyer's Gas Turbine Engineering HandbookやSawyer's Turbomachinery Maintenance Handbookなどの著書でも知られています。ASMEの関係でも多彩な経歴を有し、1956年からガスタービン部会の創立に携わり、1961年から1年間その部会長も勤めました。特に会議や展示関係では1958年のワシントンにおける第一回ガスタービン会議及び展示会で既にGeneral Arrangement Chairmanをされたほどの実績を有し、その経験は東京でも遺憾なく発揮されてこの種の催しに経験の少ない我々日本側の委員達を

少なからず助けてくれたことでした。更に第一回ガスタービン会議の後にも何回か来日されて我々にいろいろな面で援助を惜しみませんでした。ジャックとトムは姓は同じでも血縁関係は有りませんが、ガスタービン部会創設以来いつも密接に行動し助け合っていた仲で、少し古めかしい日本語で言えばジャックはトムに「兄事」していたようです。しかしながら二人はいろいろな意味で対照的でした。心優しいが外見的には寡黙でどこか厳しい印象のトムに比べてジャックはいかにも柔和な紳士といった風貌とそれに相応しい人柄でわれわれの相談事にも気楽に対応してくれました。また東京ガスタービン会議にはドロシー夫人もレディスプロに参加されましたが、気さくでしとやかな人柄で日本側の夫人達の人気を集めていました。家庭的にも奥様と3人の美しいお嬢様達に恵まれて首府ワシントンの郊外に幸せな家庭を営まれていて、特に思い出すのは1973年頃でしたでしょうかワシントンでのASMEガスタービン会議に出席させて頂いたところ、バンケットの席上彼が第二回トムソーヤー賞を受賞され列席者が拍手とともに全員立ち上がって祝福したときに、壇上の彼はあまりの拍手の嵐にいささか上がってしまってしばらく絶句してしまい、私と同じテーブルにいた一番下のお嬢さんが感極まって涙ぐんで居られたことを昨日のこのように思い出します。その日他にも別の賞を貰った人はいましたがこんなに大きな拍手と立礼まで受けたのは彼だけで、彼がASMEのみなさんから受けている敬意と家族からの愛情を垣間見たような気がして印象的でした。これも彼の人柄がなせるものなのでしょう。そのような幸せで光栄有る一生を終えられたジャックのご冥福を心からお祈りするとともに、生前我々に与えられた友情と貢献に深甚な感謝を捧げる次第です。

ありがとうジャック



## 第2回ガスタービンフォーラム及び見学会報告 「超低NO<sub>x</sub>化に向けての燃焼研究及び開発の動向」

三井造船(株) 高木 俊 幸

低NO<sub>x</sub>化の実現は、環境改善のため重要な事であるが、他の原動機に比べて、ガスタービンの有する特徴の一つであり、また経済性を改善するものとして注目され、低NO<sub>x</sub>燃焼に関する研究開発が国公立研究機関や各原動機メーカーにて活発に行われている。現在の最も厳しい環境規制値は84 ppm (0%O<sub>2</sub>)までになっており、自治体の指導値レベルでは40 ppm (0%O<sub>2</sub>)以下とすることが求められる場合もある。これを実現するには相当の努力を要するだけでなく、燃焼反応や流動の基礎からの検討が求められてようになってきている。こうした状況を踏まえて、平成7年11月10日に大阪大学を中心とした燃焼研究についてのフォーラム及び研究室の見学会が催された。

原動機メーカー、機器メーカー、ガス会社や大学などから約30名が参加し、水谷教授や香月教授のユーモアのある説明も織り混ぜて、和やかな中にも熱心な討議が行われた。

西委員長(宮崎大学)の開会の挨拶に引き続き、水谷教授から大阪大学における燃焼及び関連研究の分担状況、水谷研究室での燃焼研究全般(燃焼工学講座)、高城研究室での輸送現象研究(輸送現象学講座)概要及び今後の学科改組などの紹介が行われた。更に、香月教授から燃焼工学講座の研究テーマ(噴霧燃焼、乱流燃焼、高温空気燃焼、燃焼制御)、岡本助教授から輸送現象学講座の研究テーマ(乱流拡散構造、対向流拡散火炎の動的挙動と安定性、噴霧流中の液滴の挙動など)の狙いと内容について紹介された。

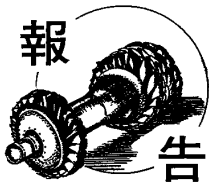
引き続き、両研究室の実験室の見学を行い、研究を担当されている院生や学生から直接説明を受けることができた。興味のある研究について個々に見学できるように配慮されていたのは、非常に親切なことであった。両研究室併せて、10以上の実験テーマがあり、また、大学で行っている研究だけに、その内容について理解するのはなかなか

大変であったが(筆者の日頃の勉強不足?)、見学者の問い掛けに対し熱心に説明して頂き、各々の研究の面白さや苦勞を隙間見る事ができたのは大変有益であった。

午後はフォーラムが開催され、萬代氏(三菱重工業(株))から「ガスタービンの稀薄予混合燃焼」、赤松氏(大阪大学)から「噴霧火炎の光学的計測」、一楽氏(大阪ガス(株))から「ガスタービンやガスエンジンの排ガス再燃焼技術の開発」とそれぞれ講演が行なわれた。萬代氏からは、1600 K級低NO<sub>x</sub>燃焼器/NO<sub>x</sub> 25 ppmが商用化され、更に高いガス温度での低NO<sub>x</sub>燃焼器を開発していることや開発に当たったの技術的なポイントなどについての説明及び質疑応答が行われた。赤松氏からは、噴霧火炎の構造についての理論的モデル“油滴群燃焼”及び4つの異なる群燃焼形態に関して、光ファイバーLDVなどを用いた予混合噴霧火炎(油、H<sub>2</sub>ガス)の詳細な計測により、平均的な燃焼状態と合致する結果が得られたことが示され、質疑応答が行われた。一楽氏からは、コージェネレーションシステムにおけるガスタービン排ガス(13~15%O<sub>2</sub>, 500~600°C)のみによる追焚きシステム(ダクトバーナ)の性能や排出NO<sub>x</sub>特性などの紹介が行われ、これにより省スペース且つ省エネルギーとなり、18基が商用運転されているとの発表がされた。また、可変機構を備えたボイラバーナについても最近開発され、商用運転に入るとのことであった。以上、詳しくは学会作成の講演資料を参照して下さい。

最後に、今回のフォーラム及び見学会の開催に当たって、会場の準備から見学会まで事前に準備を行い、また当日色々とお世話を頂きました、水谷先生をはじめとする諸先生方、院生並びに学生の皆様に心より御礼申し上げます。

(地方委員会幹事)



## 第24回ガスタービンセミナーを終えて

航空宇宙技術研究所 橋本良作

平成8年1月25、26日の2日間にわたり恒例のガスタービンセミナーが153名の受講者を得て盛大に開催されました。会場は東京ガス(株)殿のご厚意により本社大会議室を借用させていただきました。交通の便はJR浜松町の駅から1~2分と近く、また当日、木枯しの吹く寒い日でしたが冷気にさらされることなく会場に行くことが出来ました。

今日のガスタービンは航空用、電気事業用、コージェネレーション用、非常用などの利用分野で最新技術の発展と豊かな運転実績の蓄積がなされております。このような状況にあって、今回ガスタービンの信頼性向上の面から、ガスタービン、周辺機器及びガスタービンシステムに関する技術の現状と将来についてのセミナーを企画し、メインテーマを「ガスタービンの信頼性向上技術」としました。

第1日目は昨年1月に発生した阪神大震災におけるガスタービンの信頼性についての調査結果の考察、火力発電プラントの運転支援システムの構築と活用、高温部品の検査技術の現状と将来、な

らびに、高温部品の余寿命診断技術の考え方及び方法の動向についての4件の講演が行われました。つづいて、2日目は航空用エンジンを定格推力より一定の値を減じて運行するDERATING OPERATIONによる信頼性、整備コストへの効果、小型コージェネ用ガスタービンのメンテナンス要領及び診断技術、事業用ガスタービンの運転実績と保守技術についての4件の講演が行われました。

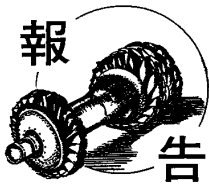
いずれも、興味深い内容と最新の技術動向や盛り込まれた講演内容であり、参加者の興味をさそい活発な質疑応答がなされました。また、本セミナーの企画及び運営内容等について参加者の方々にアンケートのご協力をいただいております。これらの結果を今後のセミナーに反映して行きたいと考えています。

おわりに、年末年始のお忙しい中、テキスト、OHP等の作成と講演の準備をして頂いた講師の方々、及び、会場を快くご提供頂いた東京ガス(株)の方々に深く感謝申し上げます。(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
MATERIAL JAPAN '96	平成8年5月21日~24日 幕張コンベンションセンター	日本経済新聞社 TEL 03-3270-0251
平成8年度 (第4回) 可視化情報講座	平成8年6月7日~7月5日 東京電機大学神田キャンパス	東京電機大学学務部学事課 TEL 03-5280-3555
第13回内燃機関シンポジウム	平成8年7月9日~11日 中央大駿河台記念館	日本機械学会 TEL 03-5360-3505
第24回可視化情報シンポジウム	平成8年7月16日~18日 国立教育会館	可視化情報学会事務局 TEL 03-5993-5020
第28回乱流シンポジウム	平成8年7月29日~31日 工学院大学	日本流体力学会 TEL 03-3714-0427
第7回計算流体シンポジウム	平成8年7月29日~31日 工学院大学	日本流体力学会 TEL 03-3714-0427
第1回環境流体シンポジウム	平成8年7月29日~31日 工学院大学	日本流体力学会 TEL 03-3714-0427
第2回アジア数値流体力学会議	平成8年12月15日~18日 東大山上会館	東京大学工学系研究科航空 宇宙工学専攻 鈴木宏二郎 TEL 03-3812-2111 (6574)





## 第24回ガスタービンセミナーを終えて

航空宇宙技術研究所 橋本良作

平成8年1月25、26日の2日間にわたり恒例のガスタービンセミナーが153名の受講者を得て盛大に開催されました。会場は東京ガス(株)殿のご厚意により本社大会議室を借用させていただきました。交通の便はJR浜松町の駅から1~2分と近く、また当日、木枯しの吹く寒い日でしたが冷気にさらされることなく会場に行くことが出来ました。

今日のガスタービンは航空用、電気事業用、コージェネレーション用、非常用などの利用分野で最新技術の発展と豊かな運転実績の蓄積がなされております。このような状況にあって、今回ガスタービンの信頼性向上の面から、ガスタービン、周辺機器及びガスタービンシステムに関する技術の現状と将来についてのセミナーを企画し、メインテーマを「ガスタービンの信頼性向上技術」としました。

第1日目は昨年1月に発生した阪神大震災におけるガスタービンの信頼性についての調査結果の考察、火力発電プラントの運転支援システムの構築と活用、高温部品の検査技術の現状と将来、な

らびに、高温部品の余寿命診断技術の考え方及び方法の動向についての4件の講演が行われました。つづいて、2日目は航空用エンジンを定格推力より一定の値を減じて運行するDERATING OPERATIONによる信頼性、整備コストへの効果、小型コージェネ用ガスタービンのメンテナンス要領及び診断技術、事業用ガスタービンの運転実績と保守技術についての4件の講演が行われました。

いずれも、興味深い内容と最新の技術動向や盛り込まれた講演内容であり、参加者の興味をさそい活発な質疑応答がなされました。また、本セミナーの企画及び運営内容等について参加者の方々にアンケートのご協力をいただいております。これらの結果を今後のセミナーに反映して行きたいと考えています。

おわりに、年末年始のお忙しい中、テキスト、OHP等の作成と講演の準備をして頂いた講師の方々、及び、会場を快くご提供頂いた東京ガス(株)の方々に深く感謝申し上げます。(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
MATERIAL JAPAN '96	平成8年5月21日~24日 幕張コンベンションセンター	日本経済新聞社 TEL 03-3270-0251
平成8年度 (第4回) 可視化情報講座	平成8年6月7日~7月5日 東京電機大学神田キャンパス	東京電機大学学務部学事課 TEL 03-5280-3555
第13回内燃機関シンポジウム	平成8年7月9日~11日 中央大駿河台記念館	日本機械学会 TEL 03-5360-3505
第24回可視化情報シンポジウム	平成8年7月16日~18日 国立教育会館	可視化情報学会事務局 TEL 03-5993-5020
第28回乱流シンポジウム	平成8年7月29日~31日 工学院大学	日本流体力学会 TEL 03-3714-0427
第7回計算流体シンポジウム	平成8年7月29日~31日 工学院大学	日本流体力学会 TEL 03-3714-0427
第1回環境流体シンポジウム	平成8年7月29日~31日 工学院大学	日本流体力学会 TEL 03-3714-0427
第2回アジア数値流体力学会議	平成8年12月15日~18日 東大山上会館	東京大学工学系研究科航空 宇宙工学専攻 鈴木宏二郎 TEL 03-3812-2111 (6574)

## 後記

次号より本学会誌もA4版に改められ、本号が従来の体裁の最後になります。このところ特集続きでしたので編集委員会において当初方針どおり特集は年1回～2回にとどめてメリハリをつけようということになり、本号は久々の普通号ということになりました。とはいえ Inlet Chilling という興味深いトレンド技術についての論説・解説記事を2編まとめて掲載できたことは、石井、中沢両委員の努力の賜であります。

学会誌である以上、質の高い技術論文を核に構成することが基本という編集委員会の考え方は変わっておりません。従来にも増して積極的に技術論文の投稿をお願い申し上げます。

また、国際ガスタービン会議—横浜大会の報告につきましては、従来組織委員長のご挨拶を12月号に掲載していたのを3月号に一括してまとめ、また内容につ

いても大幅な増ページとして充実を図りました。ご執筆頂いた実行委員長はじめ各位にはご多用中をおして大変なご苦勞を賜り、深謝申し上げる次第です。

このところ追悼記事が毎号のように編まれ、悲しい限りですが、本号におきましても、J. ソーヤー氏という本学会の誕生を力強く支えて下さった方の悲報が伝えられました。私はこの恩人について全く存じなかったのですが、佐藤氏の情感あふれる追悼のお言葉に胸をうたれました。もってご冥福をお祈り致します。

若手会員はもとより今や中堅会員でも、本学会あるいは日本のガスタービンの黎明期の状況を殆ど知らないという方は意外と多いのではないのでしょうか。本学会誌がそうした貴重な先輩諸氏の体験をとどめる上でも重要な役割の一端を担っていることを改めて考えさせられました。

(佐々木 正史)

### [ 事務局だより ]

全国的に寒波襲来で各地に大雪という気象状況をしりめに東京では温度は低いとはいってもものの連日の晴天続き。これでは夏の水不足が懸念されます。

今年度も又早くも最後の3月号になりました。この時期は決算予算、事業報告計画をはじめとして年度替わりの諸々の仕事が重なりこの事務局だよりもついつい遅れがち。今回も入稿の催促をされてやっと筆をとるという有様です。

振り返ってみれば今年度も時間に追われた一年でしたが、秋の国際会議をはじめとして開催された行事にたくさんの参加者を得、盛会だったということは企画なさった委員の方はもちろんのこと事務局にとっても大変喜ばしいことで、忙しい甲斐があったというものです。

また昨年よりお願いしております会費の自動引落としにご協力いただいた方は950名で会員のほぼ半数。残りの方のうち200名の方が、自動引落としの手続きはもとより95年分会費が未納となっており、その督促に頭を痛めております。どうぞこの事務局の気持をお汲み取りの上、自動引落としの手続き、又はご自分で送金なさってできるだけすみやかに納入下さいますようお願い致します。

最後になってしまいましたが当学会の前身、日本ガスタービン会議の初代会長の渡部一郎先生が今年初めお亡くなりになりました。渡部先生はかつて“学会誌が届くと“事務局だより”をまず先に読むんだヨ”とおっしゃって下さいました。

貴重な読者を亡くし大変残念ですが、この“事務局だより”を書くたびに先生のことが偲ばれることでしょう。

ご冥福をお祈り致します。

[A]

## 第 21 期通常総会・特別講演会のお知らせ

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

記

開催日: 平成 8 年 4 月 19 日(金) 13:00~16:30

会場: 機械振興会館地下 2 階ホール

### (1) 第 21 期通常総会

開催時間: 13:00~15:20

- 議 事:
- 1) 平成 7 年度事業報告
  - 2) 同 決算報告, 監査報告
  - 3) 平成 8 年度評議員・監事選挙結果報告
  - 4) 同 役員選出
  - 5) 同 事業計画
  - 6) 同 予算
  - 7) 名誉会員選考委員会報告
  - 8) 学会賞授与

### (2) 特別講演会

開催時間: 15:30~16:30

演題ならびに講師

「廃棄物のエネルギー回収とガスタービン」 平山 直道氏 (都立大学名誉教授)

## [平成 8 年度会費納入のお願い]

平成 8 年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚, 既に銀行引落しの手続きをなさっている方は, 平成 8 年度は平成 8 年 4 月 23 日に貴口座により引落しさせていただきます。

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

郵便振替	00170-9-179578
銀行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座 1703707

いずれも口座名は(社)日本ガスタービン学会です。

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが, 未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上, 3 月 25 日迄に事務局宛お送り下さい。自動振替をされますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願い致します。

## 第 21 期通常総会・特別講演会のお知らせ

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

記

開催日: 平成 8 年 4 月 19 日(金) 13:00~16:30

会場: 機械振興会館地下 2 階ホール

### (1) 第 21 期通常総会

開催時間: 13:00~15:20

- 議 事:
- 1) 平成 7 年度事業報告
  - 2) 同 決算報告, 監査報告
  - 3) 平成 8 年度評議員・監事選挙結果報告
  - 4) 同 役員選出
  - 5) 同 事業計画
  - 6) 同 予算
  - 7) 名誉会員選考委員会報告
  - 8) 学会賞授与

### (2) 特別講演会

開催時間: 15:30~16:30

演題ならびに講師

「廃棄物のエネルギー回収とガスタービン」 平山 直道氏 (都立大学名誉教授)

## [平成 8 年度会費納入のお願い]

平成 8 年度の会費をお納めいただく時期となりました。下記金額を所定の口座或いは事務局宛お送り下さい。

尚, 既に銀行引落しの手続きをなさっている方は, 平成 8 年度は平成 8 年 4 月 23 日に貴口座により引落しさせていただきます。

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

郵便振替	00170-9-179578
銀行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座 1703707

いずれも口座名は(社)日本ガスタービン学会です。

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが, 未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上, 3 月 25 日迄に事務局宛お送り下さい。自動振替をされますと振込手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願い致します。

## 第24回ガスタービン定期講演会・開催のお知らせ

日本ガスタービン学会(幹事団体)と日本機械学会の共催による第24回ガスタービン定期講演会を下記のように開催します。会員多数の方々の参加をお願い致します。

なお、今回は会場と開催日が例年と異なりますので、ご注意ください。

**開催日時** 1996年(平成8年)5月29日(水) 9時~17時

**開催場所** 早稲田大学国際会議場3階

所在地 東京都新宿区戸塚町1丁目早稲田大学西早稲田キャンパス・総合学術センター内

電話 03-3203-4141(大代表) 内線71-5198

交通 ・JR山手線/西武新宿駅

高田馬場駅よりスクールバス(早大正門行)、西早稲田下車、徒歩5分

・地下鉄東西線早稲田駅より徒歩10分(西早稲田キャンパス内を横断)

- ・講演プログラムは次ページをご覧ください。今回は3講演室となります。
- ・講演会終了後に、近接の早稲田大学大隈ガーデンハウスにて、懇親会を開催します。参加登録者は無料ですのお気軽にご参加下さい。

**参加登録費**(講演論文集代金を含む)

共催学会正会員	6,000円
同 学 生 会 員	3,000円
会 員 外	11,000円

**参加申し込み方法**

はがき(または、はがき大の用紙)に「定期講演会参加申込」と明記し、(1)氏名、(2)所属学会・会員番号・会員資格、(3)勤務先、(4)連絡先、(5)送金額・送金方法および送金予定日を記入し、学会事務局あてにお送り下さい。講演者も参加登録をお願いします。

準備の都合上できるだけ5月15日(水)までにご送金下さい。当日の参加登録も受け付けます。

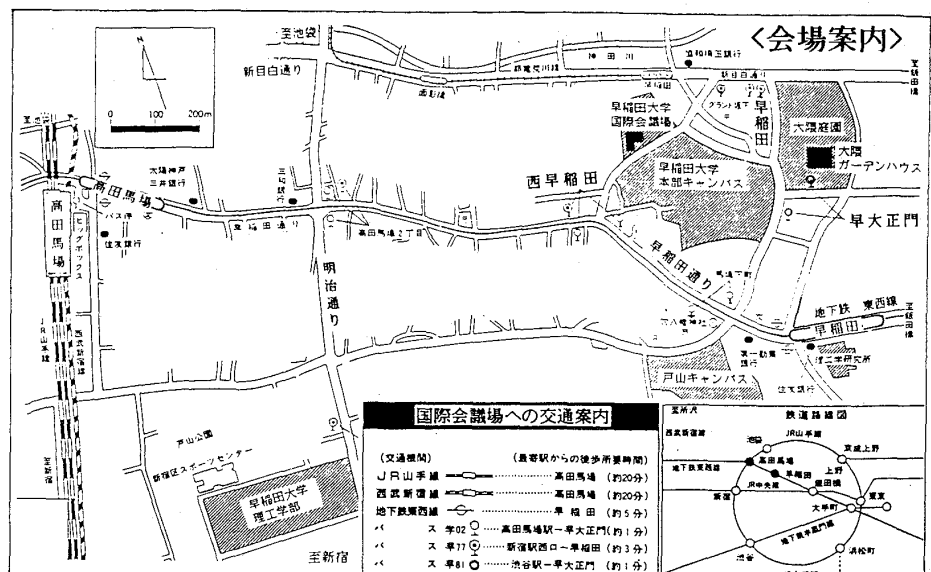
**参加登録費の送金方法**

参加登録費は下記により5月22日(水)までにご送金下さい。会社名にて銀行送金される場合は、お手数でも送金日および送金内訳を電話またはFAXにて御一報下さい。

- ・郵便振替 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(3000円、送料共)にて頒布いたしますので、学会事務局までお問い合わせ下さい。



# 第24回ガスタービン定期講演会プログラム

(一般講演 講演時間15分 討論10分、スケジュールセッション 講演時間15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		第 3 室	
9:20	<p>〈一般講演〉 燃焼 I</p> <p>A-1 新たな乱流予混合燃焼モデルの提案とその評価 * 稲毛真一、小林成嘉 (日立)</p> <p>A-2 航空エンジン用アフタバナーの研究 * 柏木 武、* 小出芳夫、新保浩司 (石川島播磨)</p> <p>A-3 超音速輸送機用ターボジェットエンジンの低NOx燃焼器の研究 * 高圧燃焼試験結果 * 木下康裕、北嶋潤一、小田剛生 (川崎重工)</p>	9:20	<p>〈一般講演〉 数値解析 I</p> <p>B-1 非構造格子を用いた曲がり管内乱流熱伝達の数値解析 * 大北洋治、児玉秀和、山脇栄道 (石川島播磨) 谷口伸行 (東大)</p> <p>B-2 排気ノズル性能に及ぼす外部流れの影響に関する研究 (続報) * 山本政彦、徳永幸二、柏木 武、山根善行、海野 大 (石川島播磨)</p> <p>B-3 ガスタービンの空力設計とCFD * 青木素直、* 伊藤栄作 (三菱重工)</p>	9:20	<p>〈一般講演〉 発電用ガスタービン</p> <p>C-1 携帯用ガスタービン発電機の開発 * 飯尾雅俊、高村東作 (日産自動車)</p> <p>C-2 300Kw級セラミックガスタービン (CGT 301) の開発 - ハイブリッドロータのガスタービンへの適用技術 - * 龍澤 正、田頭浩一郎、田岡知毅、崎田武史 (石川島播磨)</p> <p>C-3 300Kw級セラミックガスタービン (CGT 302) の研究開発 (第3報) * 市川善浩、射延 功、巽 哲男、竹原勇志、小林寛武 (川崎重工)</p>
10:35	<p>〈一般講演〉 燃焼 II</p> <p>A-4 水素予混合燃焼に関する研究 * 混合気形成とNOx排出量 * 坂東賢一、* 松浦義範 (武蔵工大) * 今川智之、荒木達雄 (武蔵工大)</p> <p>A-5 水素-酸素-水蒸気量論比混合気の燃焼速度 * 壹岐典彦、濱 純、古谷博秀、高橋三郎 (機械技研)</p> <p>A-6 CARSによる乱流予混合炎の瞬時温度測定 * 小野田昭博、小杉伸一郎 (東芝)、川口靖夫 (機械技研)</p>	10:35	<p>B-4 ターボ機械設計への非線形最適化手法の適用 * 第3報 任意形状翼の設計 * 堀端康善、新関良樹、小林 正 (東芝)</p> <p>B-5 軸流圧縮機の旋回失速予測 * 福富 清、児玉秀和 (石川島播磨)</p> <p>B-6 遷音速圧縮機翼列の失速点近傍における流れ場の数値解析 * 正木大作 (東大院)、梶昭次郎 (東大)</p>	10:35	<p>〈スケジュール・セッション〉 計測</p> <p>C-4 ラインイメージセンサによる翼間衝撃波の測定 * 山田盛志、岩崎祐介 (都立科技大院)、白鳥敏正、桜井忠一 (都立科技大)</p> <p>C-5 感温液晶を用いたタービン翼冷却流路内熱伝達率計測法に関する研究 * 船崎健一 (岩手大)、* 石澤浩平 (岩手大院) 山脇栄道 (石川島播磨)</p> <p>C-6 スプリット型熱薄膜流速計による圧縮機動翼の非定常流れ計測 * 市田一将 (早大院)、小栗 晋、田島嗣久、加藤 大、大田英輔 (早大)</p>
12:00	<p>12:00</p>	12:00	<p>11:45</p>	11:45	<p>11:45</p>

〈特別講演〉		「先進材料利用ガスをジェット技術開発の現状」		弘松 幹雄 (先進材料利用ガスをジェット研究所)	
13:10 14:10					
14:20	<p>〈オーガナイズドセッション〉 石炭ガス化発電技術 I</p> <p>A-7 石炭ガス化複合発電の技術展望 * 内田 聡 (三菱重工)</p> <p>A-8 石炭ガス化用ガスタタービン燃焼器の開発 * 山田正彦、小野田昭博、芳根俊行 (東芝)</p> <p>A-9 石炭ガス化中カロリ燃料の燃焼特性 * 長谷川武治、佐藤幹夫 (電力中央研)</p>	14:20	<p>〈一般講演〉 振動・材料</p> <p>B-7 航空用ガスタタービンエンジンの振動 * 菊池秀勝 (防衛庁)</p> <p>B-8 セラミックガスタタービンのFOD試験 * 吉田博夫 (機械技研)、大橋一生 (ヤンマーディーゼル)、島森 融、原 康 (日本特殊陶業)、吉田 真 (京セラ)</p> <p>B-9 セラミック複合材料のガスタタービンへの適用に関する一考察 * 岡村隆成、土方常夫、大熊英夫、網治 登 (東芝)</p>	14:20	<p>〈スチュデント・セッション〉 空力・圧縮機</p> <p>C-7 回転式トラバース装置を用いた翼列特性の計測 * 立石純一郎 (拓大院)、平野孝典、藤本一郎 (拓大)</p> <p>C-8 遠心ブロワの巡回失速騒音と羽根車後方流れ * 佐波泰之 (早大院)、太田 有、田島清瀬 (早大)</p> <p>C-9 斜流ディフューザの内部流れに関する研究 * 富永 潤、小西隆哉 (東京理科大学)、酒井俊道 (東京理科大)</p>
15:35		15:35		15:20	
15:45	<p>〈オーガナイズドセッション〉 石炭ガス化発電技術 II</p> <p>A-10 石炭ガス化実証プラント用燃焼器の実圧燃焼特性 * 小泉浩美、和田克夫、前沢一弘 (日立)、若井一躬 (日立エンジニアリング)</p> <p>A-11 石炭ガス化技術の開発 玉蟲文彦、* 阿部高之 (石川島播磨)</p>	15:45	<p>〈一般講演〉 タービン</p> <p>B-10 タービン翼列の非定常損失に関する研究 一直線翼列を用いた実験的研究一 * 船崎健一(岩手大)、佐々木啓徳(岩手大院) 田沼唯士 (東芝)</p> <p>B-11 タービン冷却空気の挙動に及ぼす翼列干渉の影響 * 富永純一 (早大院)、河水基伸 (早大)、山本孝正 (航技研)、大田英輔 (早大)、臼井 弘 (航技研)</p> <p>B-12 冷却タービン翼前縁部の複数集中熱源の逆解析 * 橋本孝明、井上祥史、小西 浩 (愛知技術短大)</p>	15:30	<p>〈スチュデント・セッション〉 燃焼・伝熱</p> <p>C-10 保炎器に保持された乱流希薄予混合火炎 * 土屋裕二(慶応大)、佐久間俊一(慶応大院)、川口 修 (慶応大)</p> <p>C-11 赤外線放射を利用した高温ガス/壁面温度同時測定に関する基礎研究 * 田口英俊、松木正勝 (日本工大)、三村富嗣雄、吉田豊明 (航技研)</p>
16:35		17:00		16:10	

## 平成8年度第1回見学会・技術懇談会のご案内

1. 日 時: 平成8年6月21日(金) 13:15~15:45
2. 見 学 先: 川重ガスタービン研究所 (千葉県袖ヶ浦市南袖50-1)
3. 内 容: 川崎-ABB13E2型単純開放サイクル1軸型ガスタービンを中心とする  
145MWガスタービン発電研究設備の見学と技術説明・質疑応答
4. スケジュール: 13:15 JR姉ヶ崎駅集合  
13:45 川重ガスタービン研究所到着 (貸切バス)  
13:45~13:50 挨拶  
13:50~14:15 紹介ビデオ  
14:15~14:55 施設見学  
15:00~15:45 技術懇談会 (含質疑応答)
5. 参加要領
  - 1) 定員50名 (申し込み超過の場合は抽選, 結果は応募者全員に連絡します。)
  - 2) 参加ご希望の方は「川重見学」と書き氏名, 会員番号, 所属, 連絡先住所, 電話番号を明記の上, 往復ハガキあるいはFAXにて学会事務局へお申し込み下さい。記載漏れのないようにご注意下さい。(締め切り平成8年5月20日(月))
  - 3) 参加費5000円予定 (バス代含) (当日受付にてお支払い下さい。)

## 第2回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生を対象とした標記シンポジウムを, 開催しますので奮ってご参加下さい。

1. 日 時: 平成8年7月18日(木), 19日(金)
2. 場 所: 川崎重工業(株) 明石工場内 研修センター他 (兵庫県明石市)
3. シンポジウムプログラム (予定)  
第1日目 午前: ガスタービン概論, 午後: 工場見学, 終了後懇親会  
第2日目 午前: ガスタービンと流体力学,  
午後: ガスタービンと伝熱工学, ガスタービンと燃焼工学
4. 参加要領
  - (1) 定 員: 50名
  - (2) 対 象: 工学系大学, 大学院, 高等専門学校, 工業高校在籍者
  - (3) 参加費: 無料の予定申し込み方法等の詳細は本誌6月号およびポスターをご覧ください。

## 第11回ガスタービン秋季講演会 (宮崎)・見学会

下記日程で宮崎市にて開催致します。最盛期で遠隔地でもありますので, 旅行社に交通・宿泊の団体予約を依頼することになりますが, 早めに参加のご検討をお願いします。詳細は会誌6月号に会告します

- 開 催 日 1996年 (平成8年) 11月7日(木), 8日(金)
- 開 催 場 所 宮崎市宮崎厚生年金会館 (JR 宮崎駅前)
- 講演申込締切 平成8年7月19日(金) 講演原稿締切 平成8年9月20日(金)
- 募集論文内容 詳細は会誌6月号, スチューデントセッションの企画は予定しません。
- 見 学 会 宮崎シーガイア・エンジニアリングシステム (大規模波浪発生, ガスエンジンコジェネ, 高層建築能動制振, 複合電力集中管理, 各システム) および宮崎大学新キャンパス



## 平成8年度第1回見学会・技術懇談会のご案内

1. 日 時: 平成8年6月21日(金) 13:15~15:45
2. 見 学 先: 川重ガスタービン研究所 (千葉県袖ヶ浦市南袖50-1)
3. 内 容: 川崎-ABB13E2型単純開放サイクル1軸型ガスタービンを中心とする  
145MWガスタービン発電研究設備の見学と技術説明・質疑応答
4. スケジュール: 13:15 JR姉ヶ崎駅集合  
13:45 川重ガスタービン研究所到着 (貸切バス)  
13:45~13:50 挨拶  
13:50~14:15 紹介ビデオ  
14:15~14:55 施設見学  
15:00~15:45 技術懇談会 (含質疑応答)
5. 参加要領
  - 1) 定員50名 (申し込み超過の場合は抽選, 結果は応募者全員に連絡します。)
  - 2) 参加ご希望の方は「川重見学」と書き氏名, 会員番号, 所属, 連絡先住所, 電話番号を明記の上, 往復ハガキあるいはFAXにて学会事務局へお申し込み下さい。記載漏れのないようにご注意下さい。(締め切り平成8年5月20日(月))
  - 3) 参加費5000円予定 (バス代含) (当日受付にてお支払い下さい。)

## 第2回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生を対象とした標記シンポジウムを, 開催しますので奮ってご参加下さい。

1. 日 時: 平成8年7月18日(木), 19日(金)
2. 場 所: 川崎重工業(株) 明石工場内 研修センター他 (兵庫県明石市)
3. シンポジウムプログラム (予定)  
第1日目 午前: ガスタービン概論, 午後: 工場見学, 終了後懇親会  
第2日目 午前: ガスタービンと流体力学,  
午後: ガスタービンと伝熱工学, ガスタービンと燃焼工学
4. 参加要領
  - (1) 定 員: 50名
  - (2) 対 象: 工学系大学, 大学院, 高等専門学校, 工業高校在籍者
  - (3) 参加費: 無料の予定申し込み方法等の詳細は本誌6月号およびポスターをご覧ください。

## 第11回ガスタービン秋季講演会 (宮崎)・見学会

下記日程で宮崎市にて開催致します。最盛期で遠隔地でもありますので, 旅行社に交通・宿泊の団体予約を依頼することになりますが, 早めに参加のご検討をお願いします。詳細は会誌6月号に会告します

- 開 催 日 1996年 (平成8年) 11月7日(木), 8日(金)
- 開 催 場 所 宮崎市宮崎厚生年金会館 (JR 宮崎駅前)
- 講演申込締切 平成8年7月19日(金) 講演原稿締切 平成8年9月20日(金)
- 募集論文内容 詳細は会誌6月号, スチューデントセッションの企画は予定しません。
- 見 学 会 宮崎シーガイア・エンジニアリングシステム (大規模波浪発生, ガスエンジンコジェネ, 高層建築能動制振, 複合電力集中管理, 各システム) および宮崎大学新キャンパス

## 平成8年度第1回見学会・技術懇談会のご案内

1. 日 時: 平成8年6月21日(金) 13:15~15:45
2. 見 学 先: 川重ガスタービン研究所 (千葉県袖ヶ浦市南袖50-1)
3. 内 容: 川崎-ABB13E2型単純開放サイクル1軸型ガスタービンを中心とする  
145MWガスタービン発電研究設備の見学と技術説明・質疑応答
4. スケジュール: 13:15 JR姉ヶ崎駅集合  
13:45 川重ガスタービン研究所到着 (貸切バス)  
13:45~13:50 挨拶  
13:50~14:15 紹介ビデオ  
14:15~14:55 施設見学  
15:00~15:45 技術懇談会 (含質疑応答)
5. 参加要領
  - 1) 定員50名 (申し込み超過の場合は抽選, 結果は応募者全員に連絡します。)
  - 2) 参加ご希望の方は「川重見学」と書き氏名, 会員番号, 所属, 連絡先住所, 電話番号を明記の上, 往復ハガキあるいはFAXにて学会事務局へお申し込み下さい。記載漏れのないようにご注意下さい。(締め切り平成8年5月20日(月))
  - 3) 参加費5000円予定 (バス代含) (当日受付にてお支払い下さい。)

## 第2回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生を対象とした標記シンポジウムを, 開催しますので奮ってご参加下さい。

1. 日 時: 平成8年7月18日(木), 19日(金)
2. 場 所: 川崎重工業(株) 明石工場内 研修センター他 (兵庫県明石市)
3. シンポジウムプログラム (予定)  
第1日目 午前: ガスタービン概論, 午後: 工場見学, 終了後懇親会  
第2日目 午前: ガスタービンと流体力学,  
午後: ガスタービンと伝熱工学, ガスタービンと燃焼工学

### 4. 参加要領

- (1) 定 員: 50名
- (2) 対 象: 工学系大学, 大学院, 高等専門学校, 工業高校在籍者
- (3) 参 加 費: 無料の予定

申し込み方法等の詳細は本誌6月号およびポスターをご覧ください。

## 第11回ガスタービン秋季講演会 (宮崎)・見学会

下記日程で宮崎市にて開催致します。最盛期で遠隔地でもありますので, 旅行社に交通・宿泊の団体予約を依頼することになりますが, 早めに参加のご検討をお願いします。詳細は会誌6月号に会告します

- 開 催 日 1996年 (平成8年) 11月7日(木), 8日(金)
- 開 催 場 所 宮崎市宮崎厚生年金会館 (JR 宮崎駅前)
- 講演申込締切 平成8年7月19日(金) 講演原稿締切 平成8年9月20日(金)
- 募集論文内容 詳細は会誌6月号, スチューデントセッションの企画は予定しません。
- 見 学 会 宮崎シーガイア・エンジニアリングシステム (大規模波浪発生, ガスエンジンコジェネ, 高層建築能動制振, 複合電力集中管理, 各システム) および宮崎大学新キャンパス

## 訃 報

正会員 瀬川 頼英君 55才 (日立製作所) 平成7年11月30日逝去

謹しんで哀悼の意を表します。

### 学会誌への広告掲載料改訂のお知らせ

当学会もおかげさまで設立23周年となり、会員数も約2000名を擁するまでに発展し、活発な活動を行っております。当学会誌は6, 9, 12, 3月の4回/年に各回3000部発行し、当学会の関係各位にご愛読頂いております。今般、平成8年6月号より学会誌をこれ迄のB5版からA4版に変更し、内容のより一層の充実を図るべく準備を進めております。勝手ながら、これに伴い同6月号より広告掲載料を下記の如く改訂させて頂き度、お知らせ申し上げます。当学会誌への広告掲載を広く募集致しておりますので、引続き御活用の程宜しくお願い申し上げます。

#### 1. 一般広告 (掲載1回の料金)

普通頁	現 行	改 訂 後
モノクロ半頁	30,000円	36,000円
モノクロ1頁	50,000円	60,000円
カラー1頁	200,000円	240,000円

#### 2. 求人広告 (掲載1回の料金)

普通頁	現 行	改 訂 後
モノクロ1/4頁	18,000円	22,000円
モノクロ半頁	30,000円	36,000円
モノクロ1頁	50,000円	60,000円

尚、表紙2, 3の100,000円、表紙4の150,000円は現行のままと致しております。

#### 3. お問い合わせ先

(社)日本ガスタービン学会事務局

〒160 新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話 (03) 3365-0095 FAX (03) 3365-0387

又は、ニッセイエプロ(株) 日本ガスタービン学会誌担当 越司 昭

〒105 港区西新橋1-17-5

電話 (03) 3508-9061 FAX (03) 3580-9217

### YIGTC 論文集頒布のお知らせ

1995年国際ガスタービン会議横浜大会論文集を下記により頒布しております。ご入用の場合は学会事務局までお申し込み下さい。1995年国際ガスタービン会議横浜大会実行委員会(株)コンベックス内)における取扱いは3月末にて終了します。

内容・体裁 A4版 3分冊箱入り 約1050ページ 149論文収録  
頒布価格 18000円(送料を含む)  
問い合わせ・申込先 日本ガスタービン学会事務局

## 訃 報

正会員 瀬川 頼英君 55才 (日立製作所) 平成7年11月30日逝去

謹しんで哀悼の意を表します。

### 学会誌への広告掲載料改訂のお知らせ

当学会もおかげさまで設立23周年となり、会員数も約2000名を擁するまでに発展し、活発な活動を行っております。当学会誌は6, 9, 12, 3月の4回/年に各回3000部発行し、当学会の関係各位にご愛読頂いております。今般、平成8年6月号より学会誌をこれ迄のB5版からA4版に変更し、内容のより一層の充実を図るべく準備を進めております。勝手ながら、これに伴い同6月号より広告掲載料を下記の如く改訂させて頂き度、お知らせ申し上げます。当学会誌への広告掲載を広く募集致しておりますので、引続き御活用の程宜しくお願い申し上げます。

#### 1. 一般広告 (掲載1回の料金)

普通頁	現 行	改 訂 後
モノクロ半頁	30,000円	36,000円
モノクロ1頁	50,000円	60,000円
カラー1頁	200,000円	240,000円

#### 2. 求人広告 (掲載1回の料金)

普通頁	現 行	改 訂 後
モノクロ1/4頁	18,000円	22,000円
モノクロ半頁	30,000円	36,000円
モノクロ1頁	50,000円	60,000円

尚、表紙2, 3の100,000円、表紙4の150,000円は現行のままと致しております。

#### 3. お問い合わせ先

(社)日本ガスタービン学会事務局

〒160 新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話 (03) 3365-0095 FAX (03) 3365-0387

又は、ニッセイエプロ(株) 日本ガスタービン学会誌担当 越司 昭

〒105 港区西新橋1-17-5

電話 (03) 3508-9061 FAX (03) 3580-9217

### YIGTC 論文集頒布のお知らせ

1995年国際ガスタービン会議横浜大会論文集を下記により頒布しております。ご入用の場合は学会事務局までお申し込み下さい。1995年国際ガスタービン会議横浜大会実行委員会(株)コンベックス内)における取扱いは3月末にて終了します。

内容・体裁 A4版 3分冊箱入り 約1050ページ 149論文収録  
頒布価格 18000円(送料を含む)  
問い合わせ・申込先 日本ガスタービン学会事務局

## 訃 報

正会員 瀬川 頼英君 55才 (日立製作所) 平成7年11月30日逝去

謹しんで哀悼の意を表します。

### 学会誌への広告掲載料改訂のお知らせ

当学会もおかげさまで設立23周年となり、会員数も約2000名を擁するまでに発展し、活発な活動を行っております。当学会誌は6, 9, 12, 3月の4回/年に各回3000部発行し、当学会の関係各位にご愛読頂いております。今般、平成8年6月号より学会誌をこれ迄のB5版からA4版に変更し、内容のより一層の充実を図るべく準備を進めております。勝手ながら、これに伴い同6月号より広告掲載料を下記の如く改訂させて頂き度、お知らせ申し上げます。当学会誌への広告掲載を広く募集致しておりますので、引続き御活用の程宜しくお願い申し上げます。

#### 1. 一般広告 (掲載1回の料金)

普通頁	現 行	改 訂 後
モノクロ半頁	30,000円	36,000円
モノクロ1頁	50,000円	60,000円
カラー1頁	200,000円	240,000円

#### 2. 求人広告 (掲載1回の料金)

普通頁	現 行	改 訂 後
モノクロ1/4頁	18,000円	22,000円
モノクロ半頁	30,000円	36,000円
モノクロ1頁	50,000円	60,000円

尚、表紙2, 3の100,000円、表紙4の150,000円は現行のままと致しております。

#### 3. お問い合わせ先

(株)日本ガスタービン学会事務局

〒160 新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話 (03) 3365-0095 FAX (03) 3365-0387

又は、ニッセイエブプロ(株) 日本ガスタービン学会誌担当 越司 昭

〒105 港区西新橋1-17-5

電話 (03) 3508-9061 FAX (03) 3580-9217

### YIGTC 論文集頒布のお知らせ

1995年国際ガスタービン会議横浜大会論文集を下記により頒布しております。ご入用の場合は学会事務局までお申し込み下さい。1995年国際ガスタービン会議横浜大会実行委員会(株)コンベックス内)における取扱いは3月末にて終了します。

内容・体裁 A4版 3分冊箱入り 約1050ページ 149論文収録  
頒布価格 18000円(送料を含む)  
問い合わせ・申込先 日本ガスタービン学会事務局

## 学会誌編集規定

1996.2.8 改訂

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

論説・解説、講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書、随筆	2ページ
書評	1ページ
情報欄記事	1/2ページ
3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。
8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先  
〒105 東京都港区西新橋1-17-5  
TEL 03-3508-9061 FAX 03-3580-9217  
ニッセイエプロ(株) 制作部編集室  
ガスタービン学会誌担当 越司昭

## 技術論文投稿規定

1996.2.8 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) 投稿原稿は邦文で書かれた著者の原著で、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. GTSJ Bulletin への英文技術論文の投稿に関しては、別に規定を定める。
3. 投稿原稿の規定頁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ページ以内の増頁をすることができる。
4. 投稿者は原稿執筆要領に従って執筆し、正原稿1部、副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
5. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
6. 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。
7. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
8. 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。

## 複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写する場合は、本会から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

(社)日本工学会内 学協会著作権協議会  
〒107 東京都港区赤坂9-6-41  
TEL: 03-3475-4621 FAX: 03-3403-1738

日本ガスタービン学会誌  
第23巻 第92号  
平成8年3月10日  
編集者 菅 進  
発行者 葉山 眞治  
(社)日本ガスタービン学会  
〒160 東京都新宿区西新宿7-5-13  
第3工新ビル402  
TEL (03) 3365-0095  
FAX (03) 3365-0387  
振替 東京7-179578  
印刷所 ニッセイエプロ(株)  
〒105 東京都港区西新橋2-5-10  
©1996(社)日本ガスタービン学会  
本誌に掲載したすべての記事内容は(社)日本ガスタービン学会の許可なく転載・複写することはできません。