随　筆

最近気になっていること

高原　北雄*1
TAKAHARA Kitao

始めに

私は今，高原総合研究所で21世紀社会の分析をしたり，非常勤講師で学生を教えたり，ガスタービン学会でのモニタリング委員として考えている。その他に文系の学会の理事，TAMA市民塾の塾長，稲城市の委員などを兼任して多面的な視点から宇宙船「地球号」の社会について考えている。特に物作りの工学教育の現場で感じることは多くの教官が学生に単純化・平均化した論理を数式化して教えておられるが，先端技術部品の教材をもっと積極的に使って教えて欲しいものである。このような問題も含めてオムニバス風に書かせていただきたい。

歴史観 mm／年法：私は以前に「mm／年法」を創案した。この史観では現在を東京駅・現在地とし，すべて地表面の直線距離に換算している。宇宙誕生は－1.5万km（150億年）の喜望峰，地球誕生は－4500 km（46億年）のカンボジア，生物誕生はダナン，古生代は笠岡から安城，中世代は安城から小田原，近世代は小田原から東京駅になり，人類（猿人）誕生は－4 km，氷河期は－3.5 kmから－16 mに相当する。現代社会が激変し始めたのは－23 cm（230年前）の蒸気機関の実用化で機械エネルギーを何時でも何処でも必要に応じて使えるようになったことに起因していると私は考えている。この史観から相対的に現在を認識し，未来を考える基盤にしている。

現代認識：－4 km（400万年）前から人口は100 m（10万年）毎に2倍に増え続けると仮定すれば1 km（100万年）で1000倍になり，今や世界人口が10億人となる。アバウトな指数計算では10億人も60億人も同じと考えて問題はない。江戸時代初期には世界人口は5億人と推定されているが，40年前の世界人口は30億人で今は2倍の60億人になった。このように現代に近づくと2倍になる期間は極めて短くなってきた。人口増大の一つの原因は平均寿命が急速に伸びたことにもある。この40年で倍増を続けると仮定すれば400年後には千倍の6兆人となるが，現実にはこのような激増は起こりえない。

世界の独立国を面積・人口・GNPで並べて見れば最大／最小国の比はそれぞれ，約100万倍（1 mmと1 kmの国）になる。近くインドの人口は中国を追い越して世界のトップになり，中国がGNP（世界経済）のトップに立つと考えられている。アフリカにも1億人国家のナイジェリア国家ができたが多くの問題が内在している。国連予算の一般会計は八王子市の予算とほぼ同じだ。なお八王子市の予算よりGNPが少ない独立国は40カ国を超えている。その中で米国経済の赤信号が灯り始めたと私は考えており，今後世界を抑える力が弱くなり地域紛争が多発する可能性が高いと私は推測している。今後何十年か後に日本でもエネルギーが手に入りにくくなれば更に大きな経済危機が生じ，紛争当事国になる心配もある。先年経済のノーベル賞で金融工学が話題になった。その受賞者がLTCM（ロングタームキャピタルマネージメント）社の責任者で世界中の大金を動かしていた。しかしロシアの経済破綻を読めず倒産した。今後，この金融工学も「失敗は成功の元」で必ず一時は世界から大金を集めることに成功すると考えられる。この結果必ず将来，金融工学は世界を大混乱に陥し入れると考えている。

エネルギー消費

世界のエネルギー消費について100年前と現在の正確な比較は難しい。現在のデータでも何種類かの値がある。また100年前のデータの信頼度は極めて低く，100年前との比は十数倍から何十倍と違う結果が出ている。今後直線的に100年後に10倍に増えると仮定すれば，現在の確認埋蔵量1兆トンの数倍以上を確保する必要がある。半世紀後の世界のエネルギー消費量は5トン／人・年を超える可能性は高い。更にエネルギー消費の増大は地球環境に大きな影響を及ぼすだろう。私はエネルギーバブルが弾けると麻薬のような禁断症状が現れるので，「エネルギーは人類にとって麻薬か」と感じている。環境問題を充分に抑えることができなければ宇宙船「地球号」はエネルギー資源があっても住み心地が悪くなるだろう。今後の新エネルギーは「メタンハイドレートか原子力か太陽エネルギーか？」と考えられるが，現実的な立場から多面的な吟味が必要だ。メタンそのものは温暖化ガスであり，原子力は高速増殖炉も核融合もどちらも難しい技術だ。太陽エネルギーは太陽光に直角の地面で晴天なら約1 KW／m^2，昼夜と天候と傾斜角を考えた年間地上の平均太陽エネルギーは0.1 KW／m^2以下になる。15%の発電効率の太陽電池を地球の陸地面積（1.5億km^2）の1%（150万km^2：ほぼモンゴルの国土）に張ると年間2×10^{17}KWH程度の電力が得られる。石油からの発電効率を40%と考えて石油に換算すると400億トン強になる。これは世界の年間消費85億トンの5倍程度になるが，これからの時代を考えるとさほど驚くほどの量ではない。又，そのような広大な適地があるかも問題だ。気象に影響を与えないか，電力輸送をどのように考えるかなども吟味する必要がある。食料は農業・漁業に依存しているがエネルギー資源が高価になると収量が激減し，現在の世界人口を維持できず経済力を持たない国は悲惨な目に合うことは必定だ。エネルギー危機と同時に大紛

原稿受付　1999年9月13日
＊1　高原総合研究所
〒206-0803 稲城市向陽台4-2-B-809

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

争時代が到来する心配がある。

教育観：家庭教育・社会教育・学校教育の変遷

私の子供時代までは家事労働で母を助けた。私も掃除・洗濯・風呂沸かし，料理・買物・家庭菜園など母ができる仕事は全部オン・ザ・ジョブ・トレーニングにより全身で習得し，今も家庭で使い込んでいる。その後，家電製品が入り家事労働が軽減し，両親は共稼ぎ，子供は個室（独房）に入り家族間は次第に疎遠になり，家庭教育は変質した。社会ではプライバシーの権利の声高く，学校と塾のコンピュータ型記憶教育に熱が入り，心のゆとりを失い社会教育も崩壊寸前になっている。このことは文化的素養も受け継がなくなり，次第に子供達は日本人離れを起こし始めた。今や家庭・社会教育の支援が得られず学校教育だけが残り，学級崩壊が始まった。また学校教育では憶える苦痛からか学習を「我苦愁」と感じ，大人になっても社会に適合する体質に変える生涯学習を積極的に受ける人が少なくなりつつあるようだ。本来学習は「楽修」として音楽やスポーツや料理のように楽しく指導することが望まれる。学習は野球投手やサッカーの選手のような体質改善で能力を拡大する手法だ。頭脳だけに憶えこませても試験が終わるとパソコンのメモリーのように電源を切れば忘れる覚え方は教育には適さない。技術開発も同じで教科書教育の座学の他に，心身に憶え込ませる体学が極めて必要だ。

私達の平均寿命80歳の生涯時間をベースに考えると小学校から大学卒までの16年間の総授業時間は2％弱，大学卒から60歳定年まで0.2万時間／年とすれば延べ勤務時間は12%，就寝時間は約33%，その他の50%を超えるゴールデンアワーがある。そのゴールデンアワーを家庭と社会から「楽修」で身体に覚え込んで体質改善に使えれば教育効果は極めて大きい。

私の数字の覚え方：数字も身体で覚え使えるように。物作りは多くのことを同時に判断する必要がある。それには物理的な理解こそ大切と考え，私の理解する論理と感覚を記しておく。1.26兆円は日本の人口1.26億人から1万円／人を集めた金額。世界の石油換算確認埋蔵量1兆トンは一辺約10 kmの正立方体の石油，地球を1.27 mの地球儀と考えれば約1.2 mm^3でしかない。世界の年間石油換算消費エネルギーの85億トンを世界人口60億人で割ると1.4トン／人。1トンの石油を発電効率40%，機械／電力変換効率80%とすれば「千トンの物体を1.37 km」持ち上げる仕事に相当する。1 ppm（百万分の1）は一辺1 mの正立方体に対して1 cc，1 ppb（10億分の1）は一辺10 mの正立方体に対して1 cc，1 ppt（1兆分の1）は一辺100 mの正立方体に対して1 cc，1ピコ・グラムは比重1とすれば一辺1 μmの正立方体の重さになる。先日の朝日新聞に能勢町の焼却場の排水中にダイオキシン濃度が30億ピコグラム／リッターとの記事が出ていた。これは1 m^3の水に3グラムのダイオキシンがあることを意味していたが大騒ぎにならなかった。これは微小な単位と巨大な数字で専門家も感覚的に実感が湧かなかったからだろう。15 μm：家庭にあるアルミ箔の厚さ。この厚さを憶えておくと微小長さを判断しやすい。

学校教育は如何にあるべきか

社会で最近洗脳という言葉が流行っている。私は洗う「洗脳」ではなく，染める「染脳」と考えている。学生一人一人，自分は「考えに染まっても良いのか」を常に考える必要があろう。試験を簡略化するために，答えは一つと小学校から長年，染脳され続けている。しかし社会では答えが一つのものはほとんどない。最近の先端技術は次第に成熟化し現象をあるがままに見てデータが分散していることや仮定した条件を吟味しないと最先端技術に迫れないことが次第に判ってきた。更にその教育組織で責任者といえども教育現場に足を運び，授業状況を把握していない。これでは優れた教育機関なのかと以前から強く疑問を感じてきた。TAMA市民塾で私は各講座を一回は聞く努力をしている。特に分野が未経験のところは大変面白い。TAMA市民塾では年間に30講座，延べ授業時間はほぼ500時間になる。また私も幾らか関係している西東京雑学大学では毎日曜に著名な講師を無料で招聘し学生に年間50回の講座を2千円／年の通信費だけで受講させている。理事長は毎回出席して全体を把握されている。その理事長の情熱で1年後までの予定講師が満たされている。

工学教育

世界最初の技術書「周礼工考記」に「知者創物」，「百工之事，皆聖人之作也」の哲学や車両のキャンバー技術などが書かれている。この「周礼工考記」は文系の学者にはよく知られているが，工学関係者はほとんど知られていないが大変面白いので御一読を薦めたい。学校では長い間数学を使った記号論的な工学教育が行われているが，学生は物理的な認識が充分にできていない。一般に教える側も先ず初めに知りたいという欲望を持たせる話をする必要がある。更に知恵の塊の先端技術部品を使った教育も大切だ。工学はモノ作りなれど学問部品をばらばらに教え，どのように技術開発に使うかの具体的解説がない授業が行われているようだ。これでは計算はできるが，物理的感覚量が判らないのでは知ってはいても現場で使い込めない学生が多い。財政的支援がなされても，創造的工学が身につかないのではと心配している。

SI単位は工学の基本だが，使い込めるように学生に教えられていないようだ。力の単位：1ニュートン：地上で102 gに働く力〔1000 gm／sec^2＝「102 g」×9.8 m／sec^2〕，仕事の単位：1ジュール：102 gを1 m持ち上げる仕事。仕事率の単位：1ワット：102 gを1秒間に1 m持ち上げる仕事割合。燃えた時の石油の発熱量1ジュールは15 μmの厚さで約2 mm^2の体積と極めて小さい。100万KWの発電所は毎秒1020トン（水一辺約10 mの正立方体）の物体を100 m持ち上げる仕事に相当してい

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

る。私はこの感覚を伝えるために100 gの単1乾電池に1円玉（1 g）2個を張り付け，102 gの1ニュートンの力が判る資料を数個作り授業で使っている。全学生に10回位1 m上げ下げさせて度量衡を実感させている。

ガスタービン教育

IS線図：教科書のIS線図に時々二つの等圧力線間の垂直線分がエントロピーの増加と共に広がっていないように見える図が時々見受けられる。これでは原動機の出力は得られない。吉中さんの著書「エンジンはジェットだ」にI−S線図の低圧力線形状の傾斜地に高圧力線形状の建物の屋根を配し位置のエネルギーで判りやすく説明している。授業でご利用を。

燃焼現象：ガスタービンの燃焼器内ではおおよそ1 kgの燃料を15 kgの空気（3 kgのO_2と12 kgのN_2）中の酸素3 kgと完全燃焼する。この燃焼では12 kgのN_2は3 kgのO_2と近接しているので高温均一化しやすい。その後，反応に寄与しない35 kgの空気（7 kgのO_2と28 kgのN_2）で希釈し平均温度を下げる仕事が行われている。一般に希釈空気は燃焼器の後半で混入される。混合距離は極めて短く瞬時にタービン翼に流入するので均一に混合できないと考えられる。このため温度差が大きなガス塊になり物理的に置換・混合しタービンに入ると私は考えている。このため私はI−S線図上の高圧線上で分散した温度範囲から滝の白糸のように流れて膨張仕事を得ていると考えている。その温度差が流速差を生みその剪断流でエネルギー移送が起こり，混合を促進していると私は考えている。

ガスタービンの高温・効率化でコンバイドサイクルは発電効率が近年54%とうなぎ昇りで向上してきた。ガスタービン技術は極めて多くのサブイルーチン，マイクロサブイルーチン技術の上でメインルーチンを意識しながら総合的に開発する必要がある。しかし最近のようにガスタービンの技術が成熟すると，現場からのクレームを処理しながら細かい情報を集めなければガスタービン内部を総合判断できない状況になってきたようだ。これからも技術を追いかけて開発できる人材の教育が極めて大切になっている。

百聞は一見に如ず，百見は一触・1食に如ず

私は過去に収集した航空機，ジェットエンジン，その他の多くの部品を授業中に回覧しながら空力，伝熱，燃焼，材料，加工，計測などについて総合的に講義している。その中には各種空冷タービン翼，単結晶翼，柱状晶翼，多結晶翼，各種のセラミック中子やロストワックス，直径4 mmの鋼球にレーザを1 mm角に照射し，長さ4 mmの角棒が抜けたもの，カーボンカーボン材，3次元CFRP，8000ガウスの強磁石，ヒートパイプ，記憶合金，など100点以上で授業をしている。休み時間には終戦直後の電気パン焼器でパンを作って一緒に食べたり，買ってきた宇宙食を試食させたりして身体に覚えてもらうように心がけている。これは電力の知識を持っていても，このような実物を工学的に創案できるかを問いかけるきっかけにしている。このような二日間の集中講義でも実物を観察し熱心に聞いてくれている。それは大学院生になっても実物を見たことがないことが原因のようだ。授業後に毎回書いてもらう感想文を読むと「短時間で理解が深まった，考え方が変わった」と書いてくれる学生が多い。

技術開発の問題点

航空機の比重：航空機は軽量で乗客・貨物を大量に搭載することが望まれている。このためには航空機の比重は時代と共に軽量化されてきた。そこで比重を求めるため機体の体積の資料を調べたが，何処にもデータがなく専門家に問い合わせても誰も教えてくれなかった。そこでラフに体積を求め，ジャンボ機の比重を出すと離陸重量（機体重量・ペイロード・燃料搭載）時で比重は0.2弱。燃料やペイロードを積まない機体重量では0.1弱になることが判った。機体の空力計算時には外形が判るので誰か具体的に細かい数字を調べて教えて欲しいものです。このような感覚量こそ技術開発に非常に大切と私は考えている。

航空機の巡航性能についての教科書が間違っていると大先輩に教えてもらったことがある。それは航空機の巡航性能などでは推力表示と馬力表示で違う結果を導き出している。即ち航続率を最大にする揚力係数は推力表示ならば$C_L^{0.5}/C_D$，馬力表示ならばC_L/C_Dを最大にすればよいと結論づけられている。プロペラ機は馬力表示もプロペラを介した推力表示もできる。また最近の高バイパス比ジェットエンジンもファンを駆動する軸出力の馬力表示をある精度で算出できる。何も物理的な違いを表しておらず表示方法の違いでしかない。しかし容積型エンジンやターボプロップエンジンも可能なプロペラ機を勝手に容積型エンジンと断定した制約条件を持ち込み，無理な説明をしている。これは多くの方々が物理的な理解よりも長年使い込んだ「教科書は間違いない」との染脳から生じた間違いと私は断じている。数式上，独立変数でないものを独立変数かの如く取扱ったことが原因しているようだ。物理的に考えれば直ぐに矛盾が判る極めて単純なミスだ。今までに何人かの著者に説明したが基本から理解しようとしてくれずそのままになっている。世界の教科書の不思議を吟味したい方は判りやすく論文に纏めていただきたい。

終わりに

先日，岩手県に行く用事ができ，足を伸ばして，青森の六ヶ所村にある環境科学技術研究所の研究と原燃の原子力施設（2兆円）の建設現場を，弘前大學の宮田寛教授と一緒に見学し多くの知見を得てきた。現代の技術文化を支える環境とエネルギー問題の奥の深さを強く感じてきた。その後，東海村での臨界事故があり，原子力について多くの問題が露呈した。これを機会に改めて原点からエネルギーの大切さを考えるきっかけにしていただきたいものだ。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

燃料電池——ガスタービンのライバルとして

中島　憲之*1
NAKAJIMA Noriyuki

キーワード：燃料電池，コージェネレーション

1．はじめに

1997年12月の京都での地球温暖化防止枠組み条約第3回締約会議（COP 3）以降，環境・省エネルギーに対する関心が高まっている。21世紀を目前にして，環境・エネルギー問題は，日本国内だけではなく，地球規模での対応を必要としている。この問題に応える技術として燃料の化学エネルギーを電気エネルギーに変換すると同時に発電によって生じた熱エネルギーも利用する熱電併給の「コージェネレーション」がある。ガスタービン発電は，燃料を高温燃焼させ，発電機を高速回転させて発電し，さらに排熱の利用も可能である。さて，電気化学反応を利用し発電する燃料電池発電システムもコージェネレーション機器であり，次に示す優れた特長がある。

1）発電効率が高い

燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため，送電端で36～60%（HHV基準）である。

2）環境性に優れる。

反応生成物は，基本的に水であり，NOxは微量で，SOx，ばい煙は，ほとんど発生しない。また，電池本体には駆動部分がないため，回転式発電機に比較して低騒音，低振動である。

3）熱出力も利用が可能

発電とともに熱が発生し，電力とともに熱の利用も可能である。総合熱効率は80%近くに達する。

4）多様な燃料が利用可能

燃料の水素は，天然ガスなどの炭化水素を水蒸気改質して使用でき，その他にLPG，メタノール，ナフサなどの燃料が利用できる。

5）高品位な電源

電池本体の電気出力は，直流のためインバータで交流変換し出力するため，電圧電流歪みの少ない電力を供給することが可能である。

上述のように燃料電池発電システムは，環境性・省エネルギー性に優れた発電装置であり，21世紀のエネルギー問題へ対応する有効な発電システムとして期待されている。

本稿では，開発が進められている種々の燃料電池の特長および最も商用化が間近であるりん酸形燃料電池の現状について述べる。

2．原理

燃料電池は，水素の化学エネルギーを直接的に電気エネルギーに変換する装置である。したがって，燃料を熱エネルギーから運動エネルギーに変換した後，電気エネルギーに変換する発電方式に比較して，発電効率が高く，環境性に優れるという特長がある。また，燃料電池は，通常の鉛バッテリーのように電池内部にエネルギーを蓄積することは出来ない。しかし，充電操作は必要なく，水素，酸素を供給しつづける限り発電出来る。

燃料電池本体を構成する単電池は，燃料極，空気極，電解質から構成される。燃料電池の原理を図1に示す。水素が燃料極に供給されると水素は電子を放出し，水素イオンとなる。空気極では，水素イオンと電子と酸素が反応して水が生成する。

この一連の反応において，電子は外部負荷を通過し電気的な仕事を行う。このように，水素と酸素を異なる場所で反応させることによって，水素の持つ化学エネルギーを直接電気エネルギーとして取り出せることが，電気化学的反応の特長である。

燃料極：　$H_2 \rightarrow 2H_+ + 2e^-$

空気極：$1/2\,O_2 + 2H_+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

全反応　$H_2 + 1/2\,O_2 \rightarrow H_2O$

燃料電池の出力特性の変化を図2に示す。電池の電圧

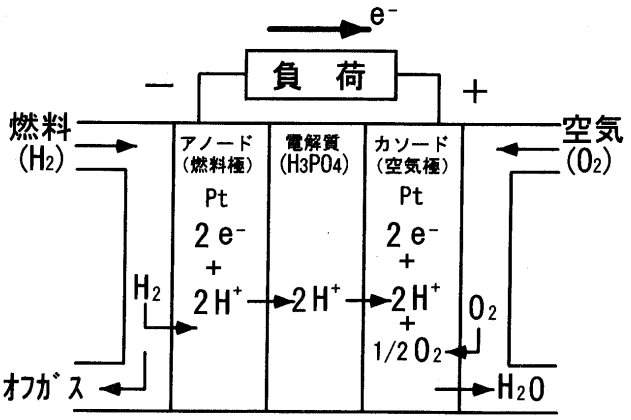


図1　燃料電池の原理

原稿受付　1999年9月7日

＊1　富士電機㈱ 新事業推進室 燃料電池部
〒290-8511 千葉県市原市八幡海岸通り7番地

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

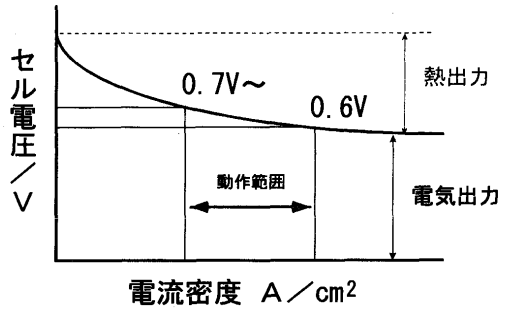


図2　燃料電池の出力特性のイメージ図

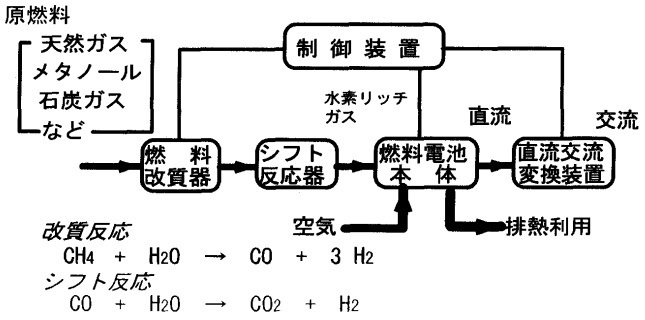


図3　燃料電池発電システムの構成

は無負荷状態でもっとも高く，負荷の電流密度を上げるにしたがって，低下する。このとき電圧低下分は熱エネルギーとして放出される。実際の使用電圧は，燃料電池では，0.6～0.7 V／単電池である。このとき熱電比約1：1となり，電池本体の発電効率は50%となる。この電池本体の効率は，電池大きさに係わらない。このため，小容量機でも変換効率が，高い。

実用的出力を得るためには，電池を多数積層して電池本体が構成されている。

3．燃料電池発電装置のシステム構成

水素を入手できる場合を除いて，燃料電池本体に供給する水素は，都市ガスなどの燃料を改質して使用する。

燃料電池発電装置のシステム構成を図3に示す。燃料改質器は，原燃料である都市ガスやLPG，メタノールなどを水素に富んだガスに変換する装置であり，改質反応により生じたCOをシフト反応器で，さらに，水と反応させ水素を生成している。このように生成した水素と空気（酸素）を燃料電池本体に供給することにより，直流電力を発生させる。この直流電力を逆変換装置で交流にし出力する。その他に，燃料電池の機器を制御する制御装置，燃料電池本体の冷却機器，反応により生成した水を回収するための凝縮器などの機器から構成される。

4．燃料電池の種類

燃料電池は，用いられる電解質の種類によって分類され，表1に示すように，種々の電解質の燃料電池が開発されている。

最も早く開発が着手された燃料電池は，100℃以下で作動し，純水素，酸素を反応物質とするアルカリ形燃料電池である。しかし，アルカリ水溶液とCO_2とが反応するため，メタンなどの炭化水素を燃料とすることは難しかった。

そのため，地上における燃料電池用には，CO_2による電解質の劣化のないりん酸形燃料電池の開発が行われた。さらに，貴金属触媒の削減，発電効率の向上を目的に高温で動作する電解質の燃料電池が開発されている。しかし，燃料電池の動作温度が高温になるほど，構成材料の耐食性，耐ヒートサイクル性など解決するべき点が多くなる。

5．開発の経緯

燃料電池の原理は，160年前の1839年に英国のグローブ卿によって発明された。しかし，燃料電池が，実用的な発電装置として登場するのは，1970年代から盛んになる宇宙船アポロ，ジェミニの電源として搭載されたことである。一方，都市ガス，炭化水素を燃料とする定置用の燃料電池の開発は，1967年の米国のガス会社が中心となって始めたTARGET計画である。日本における燃料電池の開発は，1974年，1978年の石油危機に端を発している。石油危機以降，さまざまな脱石油，省エネルギーを目指した技術開発が行われた。燃料電池の本格的な開発は1981年ムーンライト計画に取り入れられてから始まった。燃料電池の開発状況を示す例として

表1　燃料電池の種類

	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体電解質形 (SOFC)	アルカリ形 (AFC)	固体高分子形 (PEFC)
電解質	りん酸 (H_3PO_4)	炭酸塩 (Li_2CO_3, K_2CO_3)	ジルコニア (ZrO_2)	水酸化カリウム (KOH)	イオン交換膜
イオン伝導体	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}	OH^-	H^+
燃料（反応ガス）	H_2	H_2, CO	H_2, CO	H_2	H_2
原燃料	天然ガス，LPG メタノール，ナフサ，軽質油	天然ガス，LPG メタノール，ナフサ，軽質油，石炭ガス	天然ガス，LPG メタノール，ナフサ，軽質油，石炭ガス	純水素のみ	天然ガス，LPG メタノール
運転温度（℃）	170～210	600～700	900～1000	常温～100	常温～100
発電効率（%）	35～45	45～60	50～60	45～60	45～60

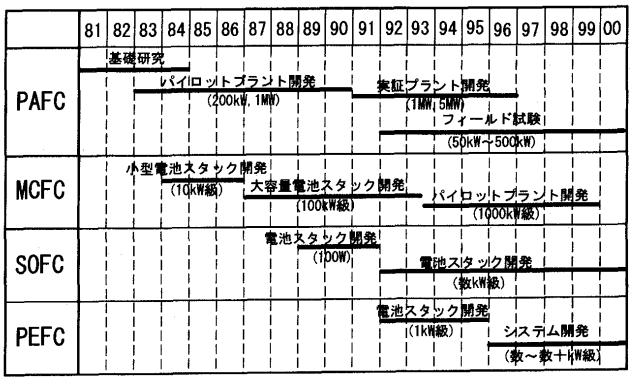


図4　NEDOの燃料電池技術開発の展開

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/05/21.

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の燃料電池技術の開発を図4に示す。[1] NEDOにおけるりん酸形燃料電池の取り組みは，1980年代から要素研究が行われ，この要素研究に続いて，パイロットプラントの開発，5 MWの実証プラント開発と段階を経ている。また，90年代に入ってから他の電解質の燃料電池に先駆けて50 kW～500 KWのフィールドテストが行われている。りん酸形燃料電池は，技術開発期間が，ほぼ20年を経過しており，種々の電解質の燃料電池の中で，実プラントの運転データがもっとも蓄積されている。MCFCについては，NEDOおよび溶融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合による1 MW級のプラントの実証運転が行われている。SOFCについては，電源開発／三菱重工による10 KW級モジュールの試験が行われている。また，固体高分子形燃料電池は，低温で動作し，改質した燃料が利用できるため，効率，環境性を評価され，自動車のエンジンに代わると予測されている。自動車のエンジンは，多量の物量が見込まれることから，コストも劇的に低下すると期待される。さらに，この低コスト化を反映すべく家庭用燃料電池の開発が，ガス会社を中心に行われている。近いうちに，実機の評価が開始される予定である。

6．りん酸形燃料電池

6.1　導入実績

りん酸形燃料電池の導入実績は，1998年2月末において海外を含めて約420台が設置されており，このうち約190台が運転を継続している。国内では160台以上の納入実績があり，81台が運転されている。[2]

燃料電池の技術開発の主な項目として，耐久性，信頼性を確保することを目指してきた。耐久性の指標のひとつとして電池寿命があり，運転時間4万時間を目標とされている。図5に累積運転時間を示すが，寿命4万時間の運転が実証された。また，信頼性の指標のひとつに連続運転時間がある。メーカーでは，年1回の定期点検を実施することを推奨しているが，図6に示すように長期間連続運用をすると複数の装置で1年間（約8600時間）を超えて無停止で連続運転された実績がある。このように，りん酸形燃料電池発電装置の耐久性，信頼性については，実用機のレベルに達してきていると評価できる。

6.2　燃料電池発電装置の例

りん酸形燃料電池の外観を図7に，仕様の例を表2に示す。100 kWという小容量においても発電効率40%（LHV）が得られ，排熱も利用すると総合効率は80%以上となる。さらに，燃料電池は，図8に示すように，定格条件での効率が高いばかりでなく，部分負荷においても高い効率が得られる特長がある。また，装置形状は，屋外設置可能なパッケージ型なので工場で組み立てから現地に輸送するので，現地で設置に係わる工期が短い。

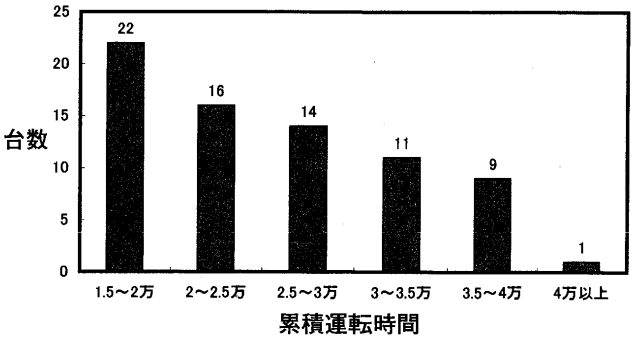


図5　累積運転実績

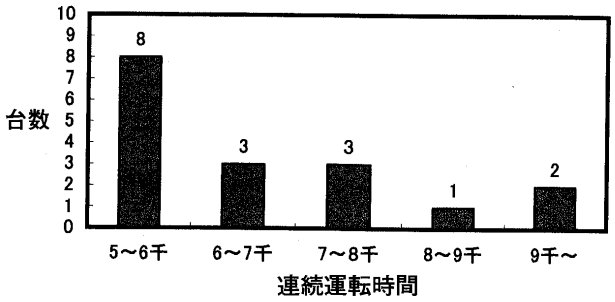


図6　無停止連続運転時間

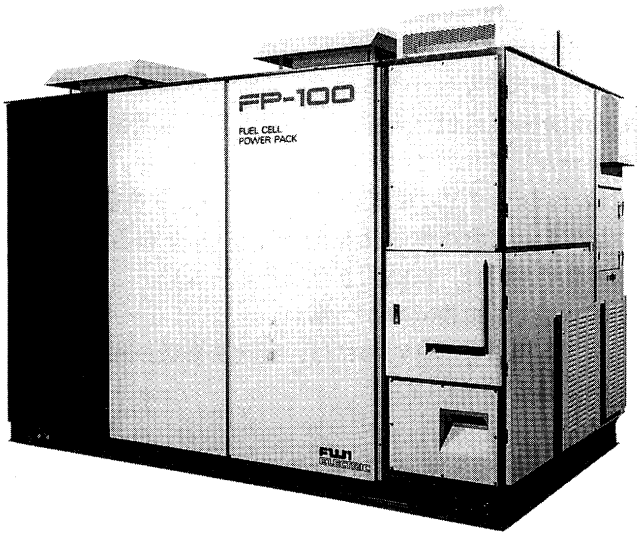


図7　100 kW燃料電池発電装置の外観

表2　りん酸形燃料電池の標準仕様の例

項	仕様値
定格出力(送電端)	100kW
出力電圧・周波数	200/220V(50/60Hz)
発電効率(送電端)	40%(LHV)
総合効率	80%(LHV)
原燃料／消費量	都市ガス 13A/22Nm^3/h
運転方式/運転形態	全自動運転/系統連系
熱出力	17%（90 ℃温水） 23%（50 ℃温水）
N Ox	5ppm以下($O_2$7%換算)
騒音特性	65dBA(機側 1m)
代表寸法	2.2m(W)x3.8m(L)x2.5m(H
重量	12ton

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

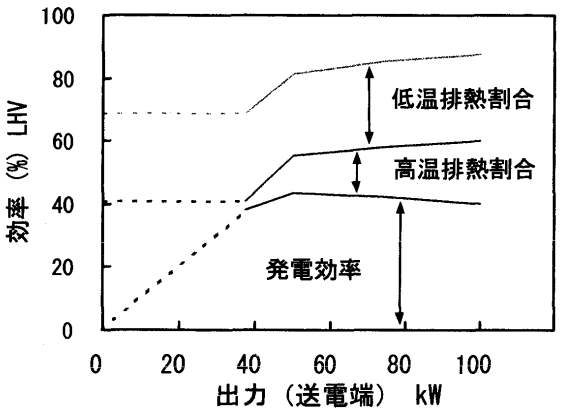


図8　100 kW 機の部分効率の実測例

6.3　周辺設備

りん酸形燃料電池発電設備を設置する際，必要な周辺設備を以下に示す。

(1)　窒素供給設備

窒素供給設備は，燃料電池発電装置を起動時に窒素ガスで装置の改質系，燃料電池をパージしてから，燃料ガスを供給する。停止時も同様に装置内の可燃ガスを窒素ガスでパージした後，停止する。稼動中は，窒素ガスを消費しない。

(2)　排熱処理装置

燃料電池の発電に伴って生じる熱は，熱利用をしない場合でも，排熱しなければならない。そのために，常時熱利用する場合を除いて，熱利用設備とは別に排熱処理装置が必要となる。

(3)　電気盤

燃料電池発電装置は，発電電力を系統に連系するための電気盤が必要となる。また，起動時には，改質器，電池の機器を動作温度に昇温するために電気ヒーターを利用する。したがって，基本的に燃料電池は，系統と連系して利用される。

(4)　水道設備・水処理設備

燃料電池発電装置において水は，燃料電池の冷却，燃料の改質反応に利用される。これらには，市水を脱イオンして利用している。このために水道設備・水処理設備が使用される。発電開始後は，生成水を凝縮回収し，脱イオンして利用するため，水道水を供給しつづける必要はない。一方，脱イオンするため，定期的に水処理樹脂の交換が必要となる。

7．運転形態

燃料を改質するプロセスを有する燃料電池発電装置では，負荷上昇時は，改質系のプロセスの応答速度が，律速となり，最低負荷から定格負荷まで10分程度を要する。一方，電気負荷の変動は，msec のオーダーで変化する。したがって，電気負荷上昇に連動して出力を上昇させることは，難しいため，あらかじめ設定された電力を出力するパターン運転を採用する場合が多い。

さらに，燃料電池発電装置は，電力負荷が必要な場合だけ運転するのではなく，連続的に運転しているケースが多い。この理由は，(1)停止状態から，起動までに4,5時間を要する，(2)装置の起動・停止時の無負荷状態が，電池本体の特性劣化を加速する，などがある。

上記の事情により，燃料電池を連続的に運転出来るかが，導入を検討する際のポイントとなる。

さらに，夜間の電力負荷が少なく電力系統に逆潮しなければならない場合，電力の買取価格が燃料費を下回ることが多く，経済的負担となる。ただし，燃料電池は，部分負荷でも発電効率が高いため，電力負荷のパターンに応じた運転が可能である。

7.1　保守性

りん酸形燃料電池の保守項目を表3に示す。発電を停止せずに行う保守項目は，生成水を回収して水処理するイオン交換樹脂，フィルターの管理が主となる。運転状態の監視については，電話回線を通じた遠隔監視が可能である。したがって，随時巡視による管理が可能である。また，電話回線を使って定期的に収集している運転データから，装置の安定状態も把握でき，予防保全にも活用できる。

発電を停止して行う点検は，1年に1回の定期点検である。この定期点検についても，メンテナンスコストの削減の観点から対象品の削減，交換期間の延長へ向けてデータを蓄積し見直しを行っている。

7.2　排熱利用の方法

りん酸形燃料電池を高効率エネルギー利用システムとして利用するためには，投入されたエネルギーのうち電力となる40%のほか，温水あるいは蒸気として排出される40%の排熱の利用が重要である。このうち，約15%が高温排熱として90℃～120℃の温水で出力される。また，オプション仕様により，蒸気取り出しが可能である。しかし，蒸気取り出しは，コストアップとなるため，温水での利用が主となるであろう。この温度レベルの排熱利用は，給湯の給水予熱が主となる。このため，設置先としては，電力／熱需要のある施設・工場が中心となる。具体的には，病院，ホテル，フィットネスクラブなどが主な設置先の対象となる。温水利用のフローの例を図9に示す。本システムでは，高温側，低温側ともに給湯の給水余熱に利用している。

表3　りん酸形100 kW 燃料電池の保守の例

項目	点検周期	内容	所用日数
運転中点検	3ヶ月毎	ﾌｨﾙﾀ清掃・交換 水処理樹脂交換	半日程度
停止点検	1年毎	ﾎﾟﾝﾌﾟ・ﾌﾞﾛｱ点検 ﾀﾝｸ熱交換器清掃	4日程度
ｵｰﾊﾞｰﾎｰﾙ	5年毎	電池本体交換 反応器触媒交換	2週間程度

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/07/21.

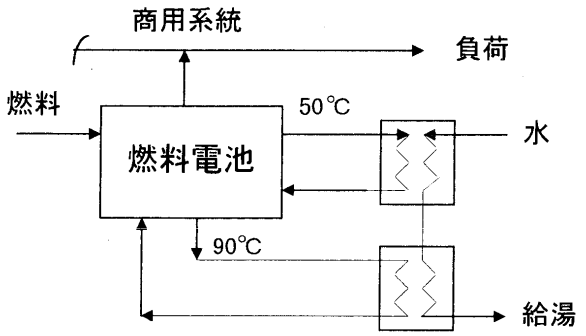


図9　温水利用のフローの例

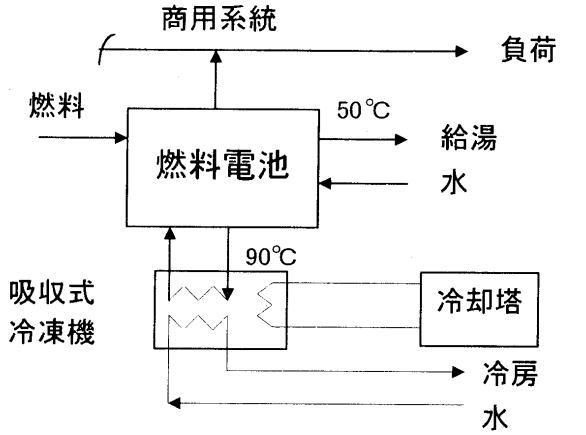


図10　冷熱利用のフローの例

また，高温側の排熱を吸収式冷凍機に供給することにより，冷熱で利用する例を図10に示す。

7.3　多様な燃料の利用例

(1)　LPGを利用する燃料電池

都市ガスを利用した燃料電池に比較してLPGを原燃料とする例は，多くない。しかし，以下に，LPGを燃料とするりん酸形燃料電池の運転実績を紹介する。一つの例は，電源開発㈱若松総合事業所殿向50 kW機はLPG燃料仕様であり，1年以上におよぶ10,059時間の無停止連続運転を達成した。(累積運転時間31,158時間，平成11年3月31日以後保管)[3]

また，もう一つの例は，中部電力㈱神城変電所殿向50 kW機で，平成8年11月の運転開始後の累積運転時間は22,000時間（平成11年6月現在）に達し，稼働率90%以上で運転中である。[3]

LPG燃料を使用する場合も実用レベルに達しつつあることが示されている。[3]

(2)　バイオガスを利用する燃料電池

バイオガスは，食品の製造工程場からでる有機性排水を排水処理設備において嫌気処理（メタン発酵処理）した際に発生するガスであり，排水に含まれる有機物を嫌気性細菌の作用によりメタンガスや二酸化炭素に還元分解するものである。この処理方法の特長は，発生するガスがメタンガスであるため回収して再利用が可能である，

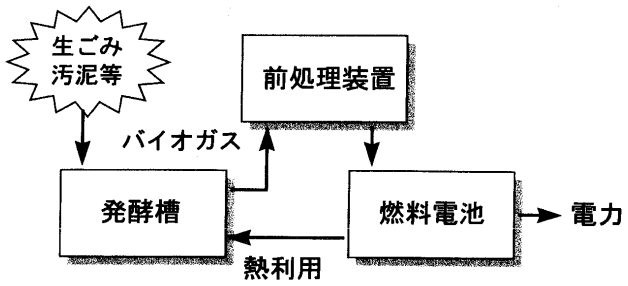


図11　バイオガス利用燃料電池発電システムの概念

余剰汚泥が少ないという特長がある。バイオガスは，従来，ボイラー燃料として利用されており，その成分は，メタン約70%，二酸化炭素約30%の低カロリーガスであり，その他に微量の硫黄成分，その他の不純物が含まれる。これを直接燃料電池に用いると電池本体に悪影響を及ぼすため，前処理設備において硫黄成分の除去を行う。バイオガスを燃料に用いた例としてビール工場での実施例がある。[4]

バイオガスを利用した燃料電池発電システムの概念図を図11に示す。本構成例では，燃料電池の排熱は排水処理システムの加温や工場内の熱利用設備への供給熱源として利用している。このような適用例では，従来ボイラー燃料として利用されていたバイオガスを電気エネルギーに変換でき，工場内の電気料金を削減することが可能となり，導入のメリットが多い。このバイオガスを燃料とする燃料電池は，食品工業の排水処理の分野に限らず，下水処理場，生ごみ処理分野にも応用可能であることから，今後，普及が期待される。

(3)　副生水素を利用する燃料電池

電解工場，石油化学工場などの製品製造工程で発生する水素を副生水素という。副生水素の多くは合成塩酸を製造するための原材料，隣接する化学工場への外販ガスとして利用されている。しかし，余剰分は自家発ボイラーの燃料に使用されている。この余剰分の副生水素を燃料電池の燃料として使用するシステムは，発生する電気出力とともに排熱も当該工場利用できるため，省エネルギーシステムが実現できる。本システムの外観を図12に，そのシステム構成を図13に示す。特に電解工場から発生する副生水素は，ほとんど処理が必要ないことから，都市ガスなどの炭化水素を燃料とする燃料電池のシステムに比較して脱硫器，改質器，CO変成器などの改質系の反応器を省略できるというメリットがある。一方，燃料電池からの未反応の水素を効率よく利用するために可変エゼクタを利用した水素リサイクル技術を用いている。本プラントは，冷起動時間が1.5時間以内と短く，燃料改質のための蒸気が必要でないことから50%負荷においても高位排熱の割合が25%と非常に高い値を示し，水素を利用する特長が確認されている。1999年6月末において運転時間は17,500時間に達しており引き続き実用性の検証・評価を行っている。[5]　副生水素を燃

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/28

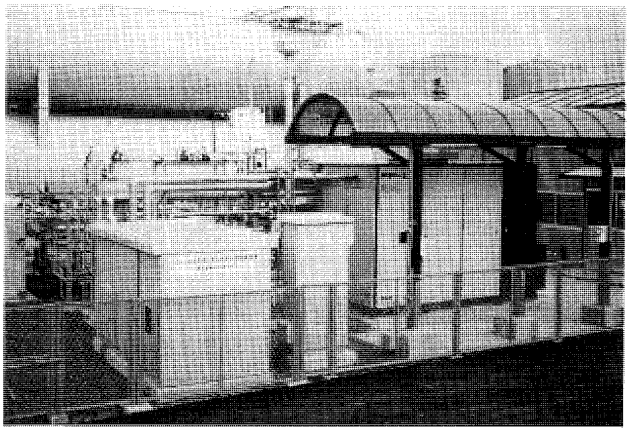


図 12　副生水素利用燃料電池システムの外観

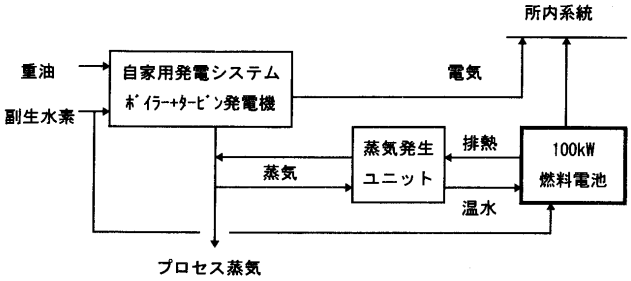


図 13　副生水素利用燃料電池発電システムの構成

料とした燃料電池は，省エネルギーの観点から，是非とも推進されるべき技術である。

7.4　その他の用途開発

今後，普及を推進する上で燃料電池の特長を生かした用途開発が行われている。その例を，以下に示す。

(1)　防災用電源

多様な燃料を改質して利用できるため常時は都市ガスで運転しており，都市ガスが利用できない場合には，貯蔵燃料である LPG に切り替えて発電することができる。これを利用したマルチ燃料システムは，防災用途に利用できる。

(2)　UPS 代替電源

燃料電池は直流を発電し，インバータで交流に変換して出力しており，電圧電流歪みの少ない交流出力が可能である。この直流を発電し，インバータで交流に変換する方式は UPS（uninterrutible power system：無停電電源装置）と同様である。UPS はバッテリの充電放電を伴うため変換ロスが生じる。一方，燃料電池は，この充電放電がないため，安定な電源を効率よく達成できる。ただし，突入電流が生じるような誘導回転機器のような負荷には，追従することが難しい。それに対応する場合には，燃料電池は，常に 100% の出力で，重要負荷で余った電力を系統に連系して供給するツーインバーター方式がある。[6]

8．商用化への課題

前節まで記載したようにりん酸型燃料電池は，性能，耐久性の面では実用レベルに達しており，一層の普及が望まれている。その課題は，装置のイニシャルコストのほか，保守費，5 年毎のオーバーホール費用のコストダウンである。コスト面で比較すると，燃料電池による電力コストに占める燃料費は，都市ガス 13 A の料金が 60 円／m^3 とすると 13.2 円／kWh（発電効率 36% HHV として）となる。100 kW－200 kW クラスのガスタービンの実績は多くないが，その発電効率は，燃料電池の 5 割～7 割程度であると推定され，このため，ガスタービンに比較して安価となる。しかし，5 年毎のオーバーホールを含む保守管理費は，ガスエンジン発電機並みとされる 3 円／kWh に向けてコスト削減の途上である。また，イニシャルコストは，燃料電池が 40 万～70 万円／kW であり，エンジンコジェネに対して 2～3 倍程度と高い。これらのコスト削減については，電池本体の材料コストに占める比率が高いカーボン素材のコストダウン，さらに，製造工数，積層組み立て工数を低減するほか，量産化に対応できる生産技術開発が必要になる。素材メーカーを含めて，電池メーカーの早急な対応が求めれている。また，5 年毎のオーバーホールについても，オーバーホール期間の延長，リサイクル技術の開発なども求められている。そのコストダウンが達成されるまでは，先導的ユーザーへの導入補助が非常に大切である。

9．おわりに

環境への関心が高まりつつある今日，燃料電池は新エネルギー装置として，その利用の促進に関する法律が施工され，導入意欲が高まりつつあると感じる。本格的な市場形成に向けて導入促進を加速するため，メーカーの努力はいうまでも無く，公的な施策の後押しが，是非，必要である。

これまでの公的機関およびユーザー各位のご指導，ご協力に感謝するとともに，今後ともなお一層のご理解とご支援をお願いするものである。

参考文献

(1)　中島憲之，第 21 回・第 22 回新エネルギー講演会(1998)，P 2－7，社団法人日本電機工業会
(2)　財団法人新エネルギー財団，リン酸型燃料電池発電システム導入検討手引き（1998），P 13
(3)　大内　崇，FC NEWS LETTER,Vol. 11　No. 4，(1999－)，P－2，燃料電池情報センター
(4)　大橋伸吾，環境管理，VOL. 35，No. 4，(1999)，P－32
(5)　三木，長谷川，FC NEWS LETTER, Vol. 11　No. 4，(1999－)，P－4，燃料電池情報センター
(6)　伊藤俊之，クリーンエネルギー，Vol. 8　No. 3，(1999)，P 19，日本工業出版

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

ガスタービンに関する標準化活動の現状と動向

青木　千明*1
AOKI Chiaki

1．はじめに

ガスタービンに関する標準化について，特に国際標準規格ISOの作成に関わる活動，及びそれらに対応して国際規格と整合化した日本工業規格JISの作成に関わる活動に関して，最近の状況及び動向をここにご紹介する。

ガスタービンに関する標準化活動については，去る1996年9月号の当学会誌で，かなり詳細に経過，活動状況，動向などについて，既にご報告しているので[1]，ここでは主にそれ以降の動きを中心に，述べさせていただくことにする。

2．ISO／TC 192専門委員会の活動と関連ISO

2.1　ISOでのガスタービン関係活動の概要

国際標準化機構ISOでのガスタービンに関する活動は，ISO／TC 192（ガスタービン）専門委員会で行われている。これに対する日本の参加組織は，日本工業標準調査会JISC（Japan Industrial Standards Committee／事務局は通商産業省工業技術院標準部）であり，国内でのISO／TC 192に対応する審議団体としては，工業技術院の委託を(財)日本規格協会を通して日本内燃機関連合会（日内連）が受けて実施している。

ISO／TC 192は，当初は，1969年にISO／TC 70（内燃機関）専門委員会の中の作業グループWG 6（ガスタービン）として発足し，その後1971年にISO／TC 70／SC 6（ガスタービン）分科会となり，さらに1988年にISO／TC 70から独立してISO／TC 192（ガスタービン）専門委員会となったものであるが，この間，継続的にガスタービンに関するISOの作成を行ってきている。

ISO／TC 192（ガスタービン）専門委員会の活動範囲は，「すべての形式，すべての用途のガスタービン［コンバインドサイクル(コージェネレーションを含む)のシステムを含む］に対する標準化」となっている。したがって，航空用ガスタービンもこの範囲に入っており，その際にはISO／TC 20（航空機及び宇宙航行体）専門委員会と調整をとって行うことになっているが，現在のところまだその段階までは行っていない。

近年の世界の経済状況及び貿易活動の動向から見て，国際規格の重要性はますます高まってきており，世界貿易機関(WTO)における協定において，国際貿易に不必要な障害を排除していくために，各国が制定する規格について国際規格を基礎として用いることが示されている。

対応国内審議団体の業務としては，“ISO／TC 192国内対策委員会”を設置し，ISO／TC 192専門委員会及びその下部の作業グループ（TC 192／WG 1～WG 7）の国際会議への日本代表の派遣，またそれぞれの国際会議での活動に対応して国内意見をとりまとめ，国際会議への提案等の審議立案を行っており，会員及び各委員の方々の多大なご協力を得て進めている。

2.2　ISO／TC 192の構成及び国内対策委員会

ISO／TC 192（ガスタービン）専門委員会の組織，及びその下部の作業グループ（WG）の構成，並びに対応するISO／TC 192国内対策委員会の構成は，表1のとおりである。

ISO／TC 192は，現在その下部に，直接に7個の作業グループ（TC 192／WG 1～WG 7）を持っている。

国内の審議体制としては，ISOのTCに対応して“ISO／TC 192国内対策委員会”を設置しており，委員長は田中英穂先生（東京大学名誉教授）であり，主査は筆者の青木千明(日内連)，事務局は日内連である。また，ISO／TC 192委員会（本委員会）を中心に，その中に小委員会を設け，小委員会の委員からTC 192／WG 1～WG 7に対応する作業についてのまとめの担当委員をそれぞれ決めて，作業を実施している。

ISO／TC 192国内対策委員会は，年に本委員会を3回，小委員会を1回程度開催しており，さらに必要な場合には直接的な関係者による小人数の作業部会を開いて，詳細な提案，コメント等の検討・審議を行っている。

2.3　国際会議開催状況

国際会議の開催状況は，1969年にISO／TC 70／WG 6として第1回の国際会議が開かれて以来，1999年現在迄にのべ22回の会議が開催されている。このうち，ISO／TC 70／WG 6として2回（1969～1970年），ISO／TC 70／SC 6として9回（1971～1988年）開かれた。1988年の第9回ISO／TC 70／SC 6会議で，ガスタービン関係部門を新しいTC 192として独立して発足することが正式に決定され，その会議がISO／TC 192第1回会議となった。それ以降，ISO／TC 192として12回の会議が開催されている。

ISO／TC 192（ガスタービン）国際会議の開催状況は，TC 70／WG 6，TC 70／SC 6であった時代を含め，表2のとおりである。

原稿受付　1999年10月4日
＊1　日本内燃機関連合会
〒105-0004 港区新橋1-11-5 吉野ビル4階

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

表1　ISO／TC 192（ガスタービン）専門委員会の組織及びISO／TC 192国内対策委員会

TC/SC/WG	名　称	幹事国	国内対策委員会
TC192	ガスタービン［すべてのガスタービン（コンバインドサイクルを含む）］	アメリカ	TC192 委員会［1999年度の委員数は，委員長等含め32名（小委員会18名）］ 委員長　田中英穂（東京大学名誉教授） 主　査　青木千明（日内連）
TC192/WG1	騒音(注)	フランス	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG1担当 鈴木章夫（石川島播磨重工業）
TC192/WG2	排気排出物測定(注)	ドイツ	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG2担当 池上寿和（三菱重工業）
TC192/WG3	コンバインドサイクル	スイス	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG3担当 安田耕二（日立）
TC192/JWG4	用途［TC67(石油ガス工業)/SC6（装置及びシステム）との合同WG］	ドイツ	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG4担当 毛利幸雄（新潟鉄工所）
TC192/WG5	運転・保全	ドイツ	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG5担当 鈴木隆夫（東芝）［1999年3月まで］ 浜野　博（東芝）［1999年4月から］
TC192/WG6	制御・計装・補機	イギリス	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG6担当 巽　哲男（川崎重工業）［1999年6月まで］ 永井勝史（川崎重工業）［1999年7月から］
TC192/WG7	燃料・環境	アメリカ	TC192 委員会及び同小委員会で対応 WG7担当 池上寿和（三菱重工業）

（注）　TC192/WG1, WG2 は，現在は休止状態である。

ISO／TC 192になってから，1989年にTC 192の下にWG 1及びWG 2を設置し，WGの国際会議が開かれるようになった。WGは，現在7つに増えており，WGでの審議段階に応じて，ピーク時には同じWGで年に2～4回の国際会議を持つこともある。なお，現在はWG 1及びWG 2については，その作業を終了して休止状態である。

ISO／TC 192（ガスタービン）作業グループ（ISO／TC 192／WG 1～WG 7）の国際会議の開催状況は，表3のとおりである。

この中で，特記すべきことは，1996年9月に東京でISO／TC 192／JWG 4及びWG 6の国際会議を開催したことである。これについては，1997年3月号の当学会誌でも報告しているが[2]，外国からは4か国から9名の委員（ドイツ4名，イギリス3名，フランス1名，スイス1名）が参加し，日本の14名の委員と共に，4日間にわたり熱の入った討議のもとに有益な規格原案の審議を行った。また，会期中に行ったレセプション，及び半日の東京電力横浜火力発電所の最新鋭ガスタービン・コンバインドサイクルプラントの見学会，並びに会期後に実施した京都でのオプショナル・ツアー見学会などをとおして，委員相互の理解と親睦を大いに深めることができ，さらに国際会議に出る機会の少ない日本の委員も直接国際会議に出て，その様子をつぶさに知ると共に，外国の委員と知己になることができたことは，大きな収穫でもあった。この時の良好な関係が，その後の国際会議でも大きく役に立っている。この東京会議に際しては，多くの関係者から各種のご支援，ご協力をいただいたわけであり，あらためて厚くお礼を申し上げると共に，日本で国際会議を行って良かったと痛感している。

2.4　ガスタービンに関する国際標準規格と今後の動向

現在迄に，ISOとして制定又は審議中のガスタービンに関する標準規格は，表4のとおりである。

この表には，対応させて日本のJIS規格も記載している。これは，2.1項でも述べたとおり，国内規格を国際規格と整合化したものにすることが急がれており，工業技術院が平成7（1995）年度から3か年計画で進めた国際整合化推進計画の終了後も，国際整合化推進の方針は継続されており，ISO規格の審議又は制定の進捗状況を踏まえて，JIS規格の原案作成又は改正作業を進める必要があるためである。

現在のISO／TC 192での主要な作業としては，ISO 3977：1991（Gas turbines－Procurment／ガスタービン－調達仕様）にパート制を適用して9部に分割し，内容の広範化及び充実化を行っている。このために，その改正原案の検討・審議を各WGで担当して進めている。そのうちの一部のパートは，既にISOとして発行されているものもあり，またその他のパートについてもほとんどがFDIS（Final Draft Int'l Standard）又はDIS（Draft Int'l Standard）の段階になっている（表4参照）。

さらに，新規作業項目として，“発電用設備に対する要求事項”，又は“ガスタービン装置でのトレンドモニタリング・システム”などの提案が出されており，検討を進めている。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

表2　ISO／TC 192（ガスタービン）国際会議開催状況
（TC 70／WG 6，TC 70／SC 6 を含み，TC 192／WG を除く）

（1999年9月現在）

通算回数	開催年月	開催場所		会議種別	日本の参加者／人数・氏名（所属）	
1	1969-10	ロンドン	イギリス	TC70/WG6第1回	3	井口　泉（東　芝）
						河田　修（富士電）
						丹羽　高尚（三菱重）
2	1970-05	ブラッセル	ベルギー	/WG6第2回	4	井口　泉（東　芝）
						丹羽　高尚（三菱重）
						加藤　正敏（日　立）
						渡部　一郎（慶応大）
3	1971-05	ストックホルム	スェーデン	/SC6第1回	2	川田　正秋（東京大）
						樗木　康夫（日　立）
4	1972-02	パリ	フランス	/SC6第2回	2	井口　泉（防衛大）
						樗木　康夫（日　立）
5	1972-11	フランクフルト	西ドイツ	/SC6第3回	3	井口　泉（防衛大）
						青木　千明（石　播）
						渡部　一郎（慶応大）
6	1973-05	ロンドン	イギリス	/SC6第4回	1	井口　泉（防衛大）
7	1973-11	レニングラード	ソ連	/SC6第5回	3	井口　泉（防衛大）
						青木　千明（石　播）
						丹羽　高尚（三菱重）
8	1974-09	チューリッヒ	スイス	/SC6第6回	2	井口　泉（防衛大）
						丹羽　高尚（三菱重）
9	1986-06	フランクフルト	西ドイツ	/SC6第7回	1	青木　千明（石　播）
10	1987-09	モントルー	スイス	/SC6第8回	1	青木　千明（石　播）
11	1988-08	モントルー	スイス	/SC6第9回	1	青木　千明（石　播）
				(TC192 第1回)		
12	1989-06	トロント	カナダ	TC192 第2回	1	徳永　賢治（日　立）
13	1990-06	ブラッセル	ベルギー	TC192 第3回	1	三賢　憲治（三菱重）
14	1991-05	ベルリン	ドイツ	TC192 第4回	2	青木　千明（石　播）
						安田　耕二（日　立）
15	1992-06	ケルン	ドイツ	TC192 第5回	3	青木　千明（石　播）
						表　義則（三井造）
						奥原　巌（東　芝）
16	1993-05	シンシナチ	アメリカ	TC192 第6回	3	青木　千明（石　播）
						星野　和貞（日　立）
						奥原　巌（東　芝）
17	1994-06	ハーグ	オランダ	TC192 第7回	3	青木　千明（石　播）
						安田　耕二（日　立）
						巽　哲男（川崎重）
18	1995-06	ヒューストン	アメリカ	TC192 第8回	2	安田　耕二（日　立）
						巽　哲男（川崎重）
19	1996-06	バーミンガム	イギリス	TC192 第9回	3	安田　耕二（日　立）
						巽　哲男（川崎重）
						手島　清美（三井造）
20	1997-06	オーランド	アメリカ	TC192 第10回	2	手島　清美（三井造）
						長　義守（石　播）
21	1998-06	ストックホルム	スェーデン	TC192 第11回	1	吉川　修平（富士電）
22	1999-06	インディアナポリス	アメリカ	TC192 第12回	2	安田　耕二（日　立）
						毛利　幸雄（新　潟）
23	2000-05	ミュンヘン	ドイツ	TC192 第13回	1＋	（予定）
24	2001-06	ニューオルリーンズ	アメリカ	TC192 第14回	1＋	（予定）

2.5　国際規格案の審議及び国内対策委員会の運営について

ISO／TC 192 に関係する国際規格審議に関連して，次のような考え方で進めている。

(1)　ガスタービンについては，コンバインドサイクル又はコージェネレーション・プラントを含め，日本は生産・技術開発の面においても，設置・使用の面においても，現在世界の中でトップクラスのきわめて重要な位置を占めており，その立場を踏まえて，積極的に国際規格に日本の意見を提案し，また反映するように，進めていく。

(2)　そのためにも，国際会議には，TC 192 の本会議はもとより WG を含めすべての会議には日本から代表者を派遣して，日本の意見を早期段階から国際規格の原案の作成に反映するようにする。

(3)　WG の国際会議などは，前後の会議の間隔が比較的

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

表3　ISO／TC 192（ガスタービン）作業グループ（TC 192／WG）国際会議開催状況

（1999年9月現在）

会議種別	開催年月	開催場所		日本の参加者／人数・氏名（所属）	
WG 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,					
WG 2	1989-09	フランクフルト	西ドイツ	1	森　信男（三菱重）
WG 2	1990-12	フランクフルト	ドイツ	1	三島　浩史（三菱重）
WG 2	1991-05	ベルリン	ドイツ	1	青木　千明（石　播）
WG 3	1991-05	ベルリン	ドイツ	1	安田　耕二（日　立）
WG 2	1991-09	ブダペスト	ハンガリー	1	森　義孝（三菱重）
WG 3	1991-11	バーデン	スイス	1	安田　耕二（日　立）
WG 2	1992-06	ケルン	ドイツ	1	青木　千明（石　播）
WG 3	1992-06	ケルン	ドイツ	1	熱田　正房（日　立）
WG 4	1992-06	ケルン	ドイツ	1	表　義則（三井造）
WG 5	1992-06	ケルン	ドイツ	1	奥原　巖（東　芝）
WG 2	1992-11	フランクフルト	ドイツ	1	青木　千明（石　播）
WG 4	1992-11	フランクフルト	ドイツ	1	青木　千明（石　播）
WG 5	1992-11	フランクフルト	ドイツ	1	青木　千明（石　播）
WG 3	1992-11	バーデン	スイス	1	星野　和貞（日　立）
WG 2	1993-03	フランクフルト	ドイツ	1	奥原　巖（東　芝）
WG 4	1993-03	フランクフルト	ドイツ	1	奥原　巖（東　芝）
WG 5	1993-03	フランクフルト	ドイツ	1	奥原　巖（東　芝）
WG 2	1993-05	シンシナチ	アメリカ	1	青木　千明（石　播）
WG 3	1993-05	シンシナチ	アメリカ	1	星野　和貞（日　立）
WG 4	1993-05	シンシナチ	アメリカ	1	安部　利男（三井造）
WG 5	1993-05	シンシナチ	アメリカ	1	奥原　巖（東　芝）
WG 3	1993-09	ボーンマス	イギリス	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1993-09	ボーンマス	イギリス	1	奥原　巖（東　芝）
WG 5	1993-09	ボーンマス	イギリス	1	奥原　巖（東　芝）
WG 3	1994-01	バーデン	スイス	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1994-03	フランクフルト	ドイツ	1	手島　清美（三井造）
WG 5	1994-03	フランクフルト	ドイツ	1	手島　清美（三井造）
WG 3	1994-06	ハーグ	オランダ	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1994-06	ハーグ	オランダ	1	青木　千明（石　播）
WG 6	1994-06	ハーグ	オランダ	1	巽　哲男（川崎重）
WG 4	1994-10	ポートランド	アメリカ	1	手島　清美（三井造）
WG 6	1994-10	ポートランド	アメリカ	1	乃村　春雄（川崎重）
WG 3	1994-12	フランクフルト	ドイツ	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1995-02	エッセン	ドイツ	1	手島　清美（三井造）
WG 6	1995-02	エッセン	ドイツ	1	手島　清美（三井造）
WG 4	1995-04	バーデン	スイス	1	長妻　宏（東　芝）
WG 4	1995-06	ヒューストン	アメリカ	2	巽　哲男（川崎重） 安田　耕二（日　立）
WG 6	1995-06	ヒューストン	アメリカ	2	巽　哲男（川崎重） 安田　耕二（日　立）
WG 3	1995-08	ウィーン	オーストリー	－	［出席不可／コメント送付］
WG 4	1995-11	フランクフルト	ドイツ	1	手島　清美（三井造）
WG 4	1996-03	フランクフルト	ドイツ	1	手島　清美（三井造）
WG 3	1996-06	バーミンガム	イギリス	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1996-06	バーミンガム	イギリス	2	手島　清美（三井造） 安田　耕二（日　立）
WG 7	1996-06	バーミンガム	イギリス	2	岩崎　洋一（三菱重） 安田　耕二（日　立）
WG 4	1996-09	東京	日本	14	田中　英穂（東京大）他
WG 6	1996-09	東京	日本	10	田中　英穂（東京大）他
WG 3	1996-11	ミラノ	イタリー	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1996-12	ベルフォート	フランス	1	手島　清美（三井造）
WG 6	1996-12	ベルフォート	フランス	1	手島　清美（三井造）
WG 3	1997-01	スィンドン	イギリス	－	［出席不可／コメント送付］
WG 3	1997-04	バーデン	スイス	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1997-06	オーランド	アメリカ	1	手島　清美（三井造）
WG 6	1997-06	オーランド	アメリカ	1	手島　清美（三井造）
WG 3	1997-10	スィンドン	イギリス	1	安田　耕二（日　立）
WG 4	1999-06	インディアナポリス	アメリカ	2	毛利　幸雄（新　潟） 安田　耕二（日　立）
WG 4	1999-10	フランクフルト	ドイツ	1	毛利　幸雄（新　潟）

狭く，また通知から会議迄が非常に短期間のことも多く，遠隔地の日本からはなかなか参加しにくい状況になり，やむをえず欠席の場合も起こり得るが，このような場合にも，事前にコメントを送付して，日本の意見を反映させるようにしている。

(4)　国内の審議体制としては，ISO／TC 192 国内対策委員会を中心とした体制とし，また適宜必要に応じ委員の一部追加見直し等を行う。国内対策委員会における審議は，会議及び書面審議を有効的に組み合わせ，効率的かつ実質的な審議・運営を行う。また，対応する国内標準化事業の JIS 原案調査作成の作業とも，効果的な連携を保つようにする。

(5)　TC 192 専門委員会と関連の深い委員会又は団体・組織，例えば，TC 208（産業用熱タービン），TC 28（石油製品及び潤滑油），TC 43（音響），TC 108（機械振動と衝撃）などの専門委員会，又は㈳火力原子力発電技術協会，石油連盟，電気事業連合会，㈳日本ガスタービン学会などの学協会，さらにこの事業の契約

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

表4　ガスタービンに関する標準規格（JIS及びISOの対応）

日本工業規格（JIS）	国際標準規格（ISO）
(JIS B 8042-1981) JIS B 8042-1994　ガスタービン－調達仕様 [ISOの追加部(Amd.1)に対するJISはまだ作成していない]	(ISO 3977-1978) ISO 3977:1991 Gas turbines - Procurement ISO 3977:1991/Amd.1:1995 Gas turbines - Procurement AMENDMENT 1:Basic procurement information for combined-cycle plants
JIS B 8042-1～-9 [将来,改正作業実施予定]	[パート制を導入して改正作業中] ISO 3977-1:1997 Gas turbines - Procurement - Part 1: General introduction and definitions ISO 3977-2:1997 Gas turbines - Procurement - Part 2: Standard reference conditions and ratings ISO/DIS 3977-3:1999 Gas turbines - Procurement - Part 3: Design requirements ISO/DIS 3977-4:1999 Gas turbines - Procurement - Part 4: Fuels and environment [1999-12-29投票締切] ISO/DIS 3977-5:1999 Gas turbines - Procurement - Part 5: Application ISO/CD 3977-6:1997 Gas turbines - Procurement - Part 6: Combined-Cycles [原案作成中] ISO/DIS 3977-7:1999 Gas turbines - Procurement - Part 7: Technical information ISO/DIS 3977-8:1999 Gas turbines - Procurement - Part 8: Inspection, testing, installation and commissioning ISO/FDIS 3977-9:1999 Gas turbines - Procurement - Part 9: Reliability,availability,maintainability and safety (RAMS) [1999-11-02投票締切]
(JIS B 8041-1972) JIS B 8041-1990　ガスタービン試験方法 JIS B 8041:~~1988~~1999　ガスタービン－受渡試験方法 [附属書A(規定)：コンバインドサイクルプラント－受渡試験方法　を含む]　[改正原案完成済]	(ISO 2314-1973) ISO 2314:1989 Gas turbines - Acceptance tests ISO 2314:1989/Amd.1:1997 Gas turbines - Acceptance tests AMENDMENT 1: Annex A (normative) Acceptance tests for combined-cycle power plants
JIS B 8043-1:~~1997~~1999　ガスタービン－排気排出物－第1部：測定及び評価　[原案完成済]	ISO 11042-1:1996 Gas turbines - Exhaust gas emission - Part 1:Measurement and evaluation
JIS B 8043-2:~~1997~~1999　ガスタービン－排気排出物－第2部：排出物の自動監視　[原案完成済]	ISO 11042-2:1996 Gas turbines - Exhaust gas emission - Part 2:Automated emission monitoring
JIS B 804X:2000　ガスタービン及びガスタービン装置－空気音の測定－実用測定方法及び簡易測定方法 [1999年度原案作成中]	ISO 10494:1993 Gas turbines and gas turbine sets - Measurement of emitted airborne noise - Engineering/survey method [ISO/TC43 & TC192]
(JIS B 0128-1970) (JIS B 0128-1983) JIS B 0128-1994　火力発電用語－ガスタービン及び附属装置　[担当：㈳火力原子力発電技術協会]	ISO 11086:1996 Gas turbines - Vocabulary
[現在まだ対応JISはない] [担当：石油連盟]	ISO 4261:1993 Petroleum products - Fuels(Class F) - Specifications of gas turbine fuel for industrial and marine applications [ISO/TC28]
(注) JISは,一般機械部会 [通商産業省工業技術院標準部標準業務課]	(注) ISOは,TC192(ガスタービン)専門委員会[幹事国はアメリカ](国内は,ISO/TC192国内対策委員会)。付記のものはそのTCによる。

摘要：1.(　)内の規格は，廃止したものである。
2.記号説明　ISO＝International Standard　FDIS＝Final Draft International Standard
DIS＝Draft International Standard　CD＝Committee Draft　WD＝Working Draft
Amd.＝Amendment　FDAM＝Final Draft Amendment　DAM＝Draft Amendment

元である㈶日本規格協会及び委託元である通商産業省工業技術院標準部標準業務課とは，緊密な連絡のもとに意見交換等も行いながら協調運営に努めている。

3．ガスタービンに関する国内標準化活動と関連JIS

3.1　JISでのガスタービン関係活動の概要

標準化においては，ISO／TC 192（ガスタービン）における国際標準化活動と並んで，ガスタービンに関する国内標準化すなわちJIS規格の原案作成に関する活動が，重要な活動となる。

先にも述べたとおり，近年は，世界貿易機関（WTO）における協定において，国際貿易に不必要な障害を排除していくために，各国が制定する規格について国際規格を基礎として用いることが示され，JISの作成においても国際規格との整合化がきわめて重要になっている。したがって，JISの対応国際規格への整合化と共に，発行されているISO又は国際的に承認されたISO原案に整合化したJIS原案の作成が，急務となっている。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

平成7（1995）年に，政府の「規制緩和推進計画（平成7年3月）」等を受け，工業技術院が平成7（1995）年度から3か年計画で進めた国内規格の国際整合化推進計画は，平成9（1997）年度で終了したが，この間にガスタービン関係では，日内連が事務局となった“JIS原案調査作成委員会”により，次のJIS規格の原案を作成し，㈶日本規格協会に提出しており，早期の制定が待たれる。

・JIS B 8043－1　ガスタービン－排気排出物－第1部：測定及び評価（1996年度原案作成）
　－ISO 11042－1：1996に対応して，整合化している。
・JIS B 8043－2　ガスタービン－排気排出物－第2部：排出物の自動監視（1996年度原案作成）
　－ISO 11042－2：1996に対応して，整合化している。
・JIS B 8041（改正）　ガスタービン－受渡試験方法［含む，附属書：コンバインドサイクルプラント－受渡試験方法］（1997年度改正原案作成）
　－ISO 2314：1989及びISO 2314：1989／Amd.1：1997に対応して，整合化している。

平成10（1998）年度からは，国際整合化推進の方針は継続させ，通常の方式によることになったが，㈶日本規格協会では，“JIS原案作成公募によるJISの制定・改正の原案作成”を行う制度を導入した。したがって，日内連でもこの制度の適用を受けて，次に述べるように，ガスタービンに関してISOと整合化したJISの原案作成の事業を積極的に進めている。

3.2　最近のJIS原案作成の活動

平成11（1999）年度には，次のJIS原案について，対応ISOに整合化したJISの原案作成を行っている。なお，原案作成委託期間は，1999年4月1日から2000年3月31日迄である。

・JIS B 804 X：2000
　ガスタービン及びガスタービン装置－空気音の測定－実用測定方法及び簡易測定方法

これに対応するISOは，次のものである。

・ISO 10494：1993
　Gas turbines and gas turbine sets－Measurement of emitted airborne noise－Engineering／survey method

実施体制としては，日内連を事務局にして，「ガスタービンJIS原案作成委員会」を設置し，またその下部に「ガスタービン分科会」を置き，原案作成を実施している。また，委員会の委員数は委員長等を含めて34名，分科会の委員数は22名であり，委員長等は，次のとおりである（敬称略）。

・委員長：田中英穂（東京大学名誉教授）
・主　査：青木千明（日内連）
・幹　事：鈴木章夫（石川島播磨重工）
・副幹事：井上保雄（アイ・エヌ・シー・エンジニアリング）

委員会の開催回数は，委員会を3回，分科会を6回，合計9回を予定している。

JIS原案作成の方針は，「JISと国際規格との整合化の手引き」（工業技術院／日本規格協会）に則って，かつ新しいJIS規格票の様式（JIS Z 8301：1996）に合わせて，対応するISOとできる限り一致したJIS原案を作成することにしている。

3.3　ガスタービンに関する国内JIS規格

現在迄に，JISとして制定又は原案作成中のガスタービンに関する標準規格は，表4のとおりである。この表は，対応させてISO規格も記載しており，2.4項のものと同じである。

3.4　JIS原案作成の今後の動向

ガスタービン関係の国際規格で，既にISO又はDISになっている規格に対し，重要なものから順にJIS原案の作成を行う必要がある。

平成12（2000）年度以降に，JIS原案作成を急ぐものとしては，次のようなものがある。

・“ガスタービン－調達仕様”（JIS B 8042－1994）の改正
　対応するISO 3977：1991が，現在パート制を導入して改正作業中であり，このISO 3977－1～－9の審議状況をみて，JISの改正作業を行っていく。

4．あとがき

ガスタービンに関する標準化の最近の活動及び動向について，国際規格ISO及び国内規格JISの両方に関して，ご紹介した。

国際規格の重要性の高まりと共に，国内規格の国際整合化がきわめて重要になってきており，標準化活動もその両方を見渡しながら，幅広くかつ早目に先を見て活動を進めていくことが，ますます必要となってきている。

これらの国内審議団体となっている日内連としても，両方を見られる好都合な立場をいかして，このような時代の動向を見極めながら，ガスタービンに関する標準化に大いに貢献していく存念である。また，このような一連の標準化活動をとおして，関係する産業活動に寄与できるものと思考している。

関係者の皆様，また委員等の方々には，多大なご理解とご協力をいただいており，ここに厚くお礼を申し上げると共に，今後も引き続いてなお一層のご支援をいただくよう，心からお願い申し上げる次第です。

参考文献

(1)　日本内燃機関連合会，日本ガスタービン学会誌，24－94，1996
(2)　青木千明，日本ガスタービン学会誌，24－96，1997

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

過給機の熱流体・熱応力連成解析における事例
― 計算格子種類についての考察 ―

小尾　幹男*1　OBI Mikio
松浦奈津子*1　MATSUURA Natsuko
武井　伸郎*1　TAKEI Nobuo

1．はじめに

最近，製造業において三次元CADを使った新しい物づくり手法を取入れる動きが盛んである。三次元CADを利用して設計段階で問題点を解決することで，開発期間の短縮を図り，顧客ニーズに合った製品をタイムリーに市場投入するという目的が背景にある[(1),(2),(3)]。

弊社汎用機械事業部では過給機（ターボチャージャ），汎用ターボコンプレッサなどの回転機械製品を扱っている。一般に回転機械は多くの機械要素を含み，高温下での高速回転という厳しい条件にさらされるものもある。従って，開発プロセスにおける解析の重要度は高く，それが開発プロセスの流れの中にスムーズに取込まれることが重要なポイントである。

過給機のタービンハウジングにおいて熱流体解析ソフトSTAR-CDで温度分布解析を行い，その結果をMSC/PATRANに渡して温度データのマッピングを行い，MSC/NASTRANで熱応力解析を実施する手法を開発した[(4)]。この解析の中で，計算格子種類の違いで，計算結果が大幅に相違することが判明したので，その原因の考察について述べる。

2．IHIにおける3次元CAD/CAEの実績

図1にIHIにおけるCAD/CAEの実績を示す。三次元CADについてはCALMAに始まりCAEDSを経て，現在はI-DEAS，Unigraphics，CATIAの3機種を主に使用している。部品サプライヤの立場では，顧客のシステムに合わせざるを得ないことと，データの用途に応じて機種を変えることもあるため，機種間のデータ変換が避けられない状況にある。ミッドレンジCADとしてAutoCADを使用し，二次元CADはMICRO CADAMを使用している。

構造解析には，MSC/NASTRAN，プリ・ポストプロ

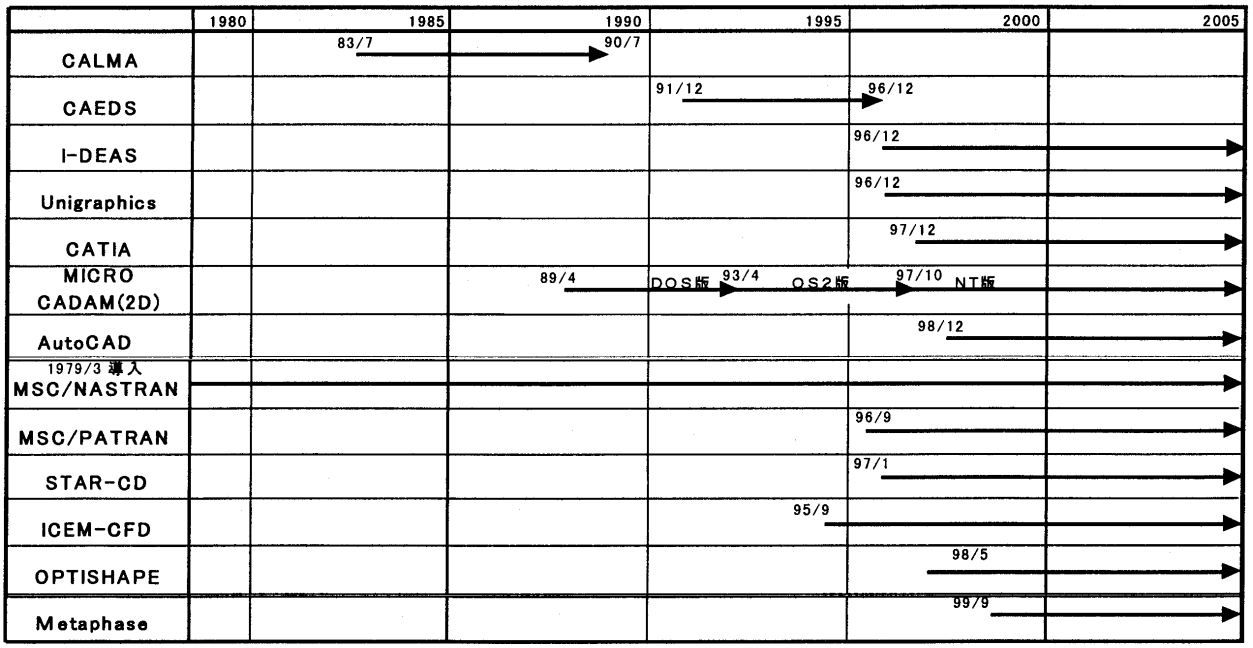


図1　IHIにおけるCAD/CAEの実績

原稿受付　1999年9月16日
＊1　石川島播磨重工業㈱ 汎用機械事業部
〒135-8733 東京都江東区豊洲3-2-316

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

セッサとしてMSC/PATRAN，I-DEASなどを，熱流体解析には，STAR-CD，ICEM-CFDを使用している。構造最適化には，OPTISHAPEを利用している。また，CADモデルとCAEを統合的に管理し，設計データの再利用を図るためPDMシステムであるMetaphaseを導入している。

3．新しい解析手順

過給機のタービンハウジングにおいて，熱流体解析によって温度分布解析を行い，その結果を構造解析に渡して熱応力解析を実施した。

図2に今後の新しい解析の手順を示す。基本的には従来の解析の流れに対して大きな変化はないが，三次元モデルデータを主体とした開発プロセスに組入れるため，三次元設計モデルが開発プロセスの中で既に作られていることを前提とした流れとなる。また，各処理をつなぐインターフェースツールを使用して処理の自動化を図っている。

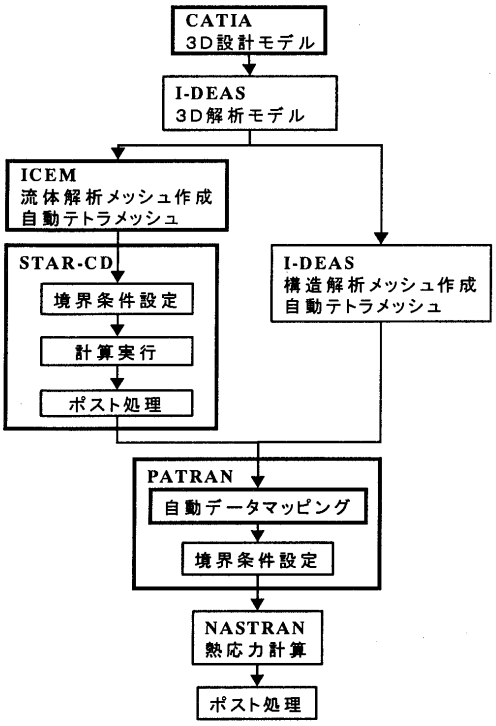


図2　新しい解析手順

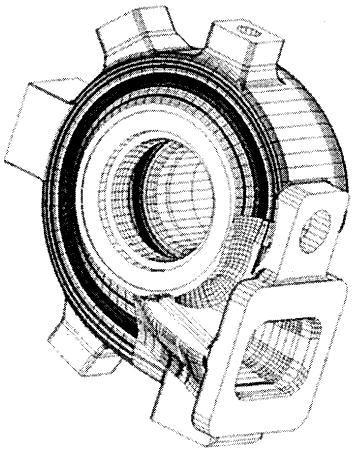


図3　タービンハウジング形状モデル

3.1　三次元モデル作成

図3に解析のもとになるモデルの例を，図4にタービンハウジングの断面を示す。

3.2　メッシュ生成

熱流体解析メッシュとしては一般的に6面体の方が解析精度は高い。しかし，新しい解析手法は従来の独立したものでなく，開発フローに組入れてマクロな視点で評価をするためのツールととらえているので，自動テトラメッシュとすることでメッシュ生成の大幅な省力化に重きを置いている。図5に熱流体解析メッシュを示す。

構造解析メッシュとして，I-DEASの自動テトラメッシュを使用すると共に，KUBRIXの自動ヘキサメッシュを使用して，生成した。図6にテトラメッシュ，図7にヘキサメッシュを示す。

テトラメッシュでの節点数は20,000節点で，要素数は82,000である。ヘキサメッシュの節点は49,000節点，要素数は36,000で大幅に減っている。

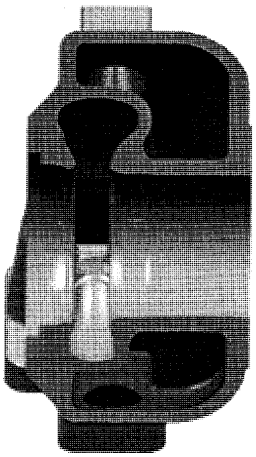


図4　水冷タービンハウジング断面

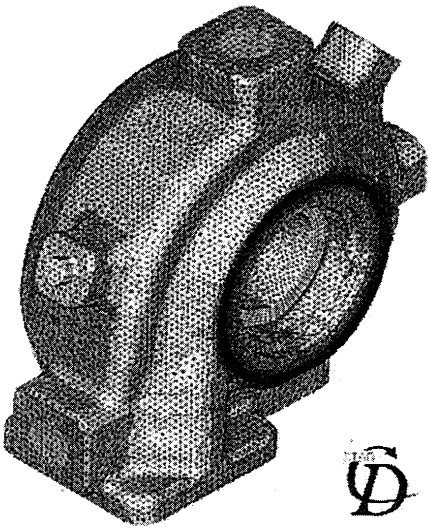


図5　熱流体解析メッシュ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

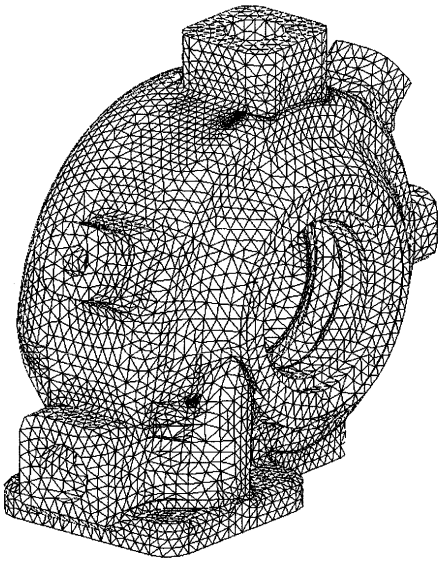


図6　構造解析テトラメッシュ

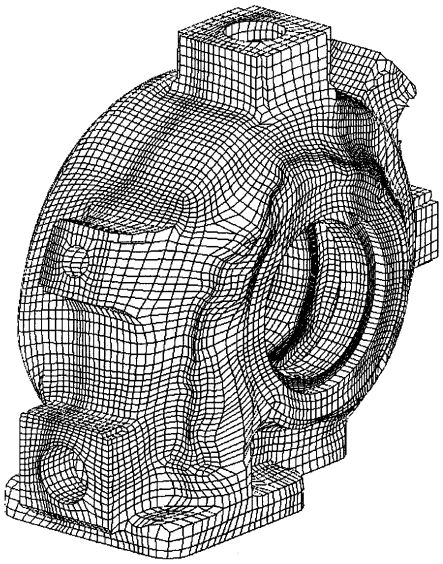


図7　構造解析ヘキサメッシュ

3.3　温度データ

図8に熱流体解析ソフトSTAR-CDで計算された固体部分の温度データを示す。この例では高温のガス通路の周りに冷却水通路があり，固体部分を通して熱の出入りがある。そこで固体部分の熱伝導も含めてSTAR-CDで計算した。結果は最近開発されたMSC/PATRANのSTAR-CD Preferenceを通して自動でマッピングした。図9にマッピング前の熱流体解析メッシュ上の温度データと，マッピング後の構造解析テトラメッシュ上の温度データを，また，図10にマッピング後の構造解析ヘキサメッシュ上の温度データを示す。いずれも良い一致が得られている。

4．熱応力・熱変位計算

熱応力・熱変位計算を，上記の通り計算格子種類を変えて計算した。図11に一次要素のテトラメッシュを使用した熱応力計算結果を，図12にヘキサメッシュを使用した熱応力計算結果を示す。

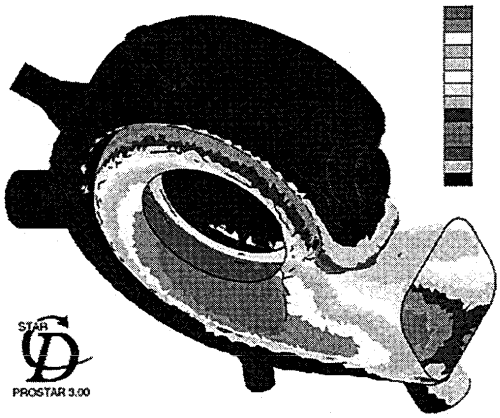


図8　温度分布計算結果

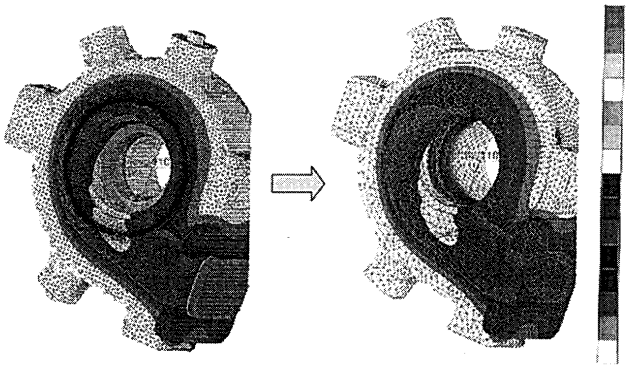


図9　温度データのマッピング（構造解析テトラメッシュ）

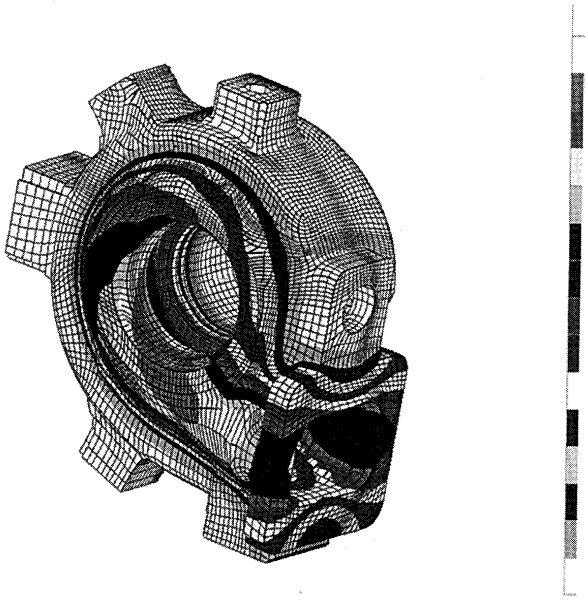


図10　温度データのマッピング（構造解析ヘキサメッシュ）

図13に一次要素のテトラメッシュを使用した熱変位計算結果を，図14にヘキサメッシュを使用した熱変位計算結果を示す。

表1に解析結果をまとめて示す。テトラメッシュの1次要素での最大応力は，ミーゼス応力で，テトラメッ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

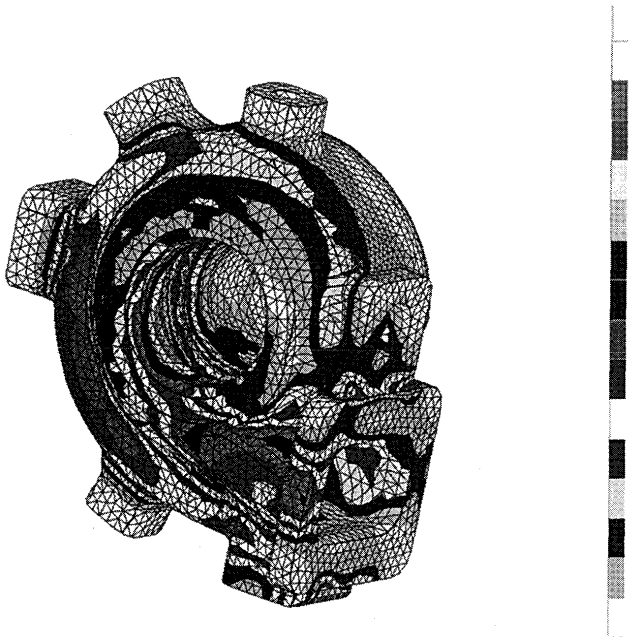


図 11　熱応力計算結果（1 次要素のテトラメッシュ）

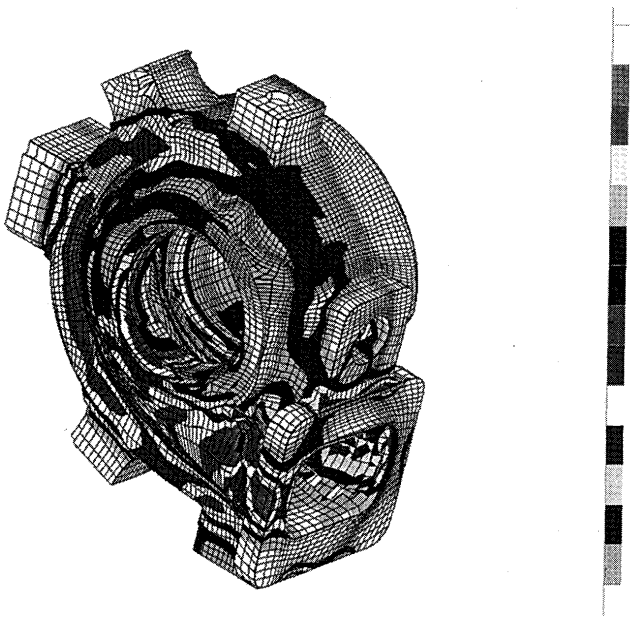


図 12　熱応力計算結果（ヘキサメッシュ）

シュの 1 次要素の 80% となり，大幅に相違する。設計の立場では，簡単な方法でメッシュを生成したいので，テトラメッシュを採用したいが，応力値が低くなるので，これで安全係数が取れたと判断するのは非常に危険である。

5．解析結果の考察

簡単な片持ち梁の問題を例として計算条件と計算格子種類を変えて計算する[5]。

解析モデルを図 15〜図 17 に示す。テトラメッシュ 1 次，テトラメッシュ 2 次，ヘキサメッシュ 1 次の 3 種類のタイプで計算する。

この内，テトラメッシュ 1 次要素についてはメッシュ

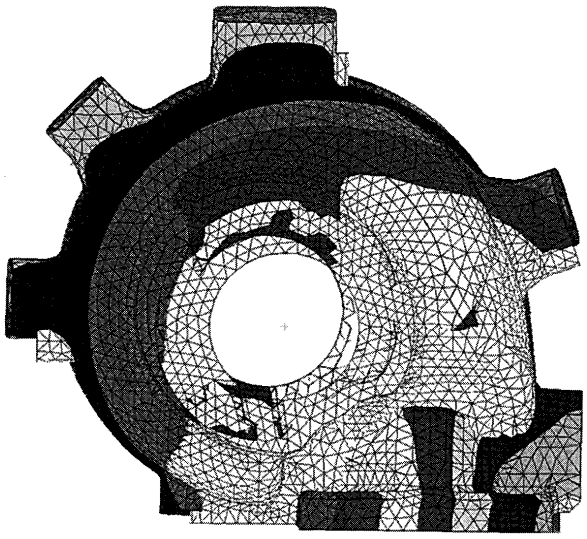


図 13　熱変位計算結果（1 次要素のテトラメッシュ）

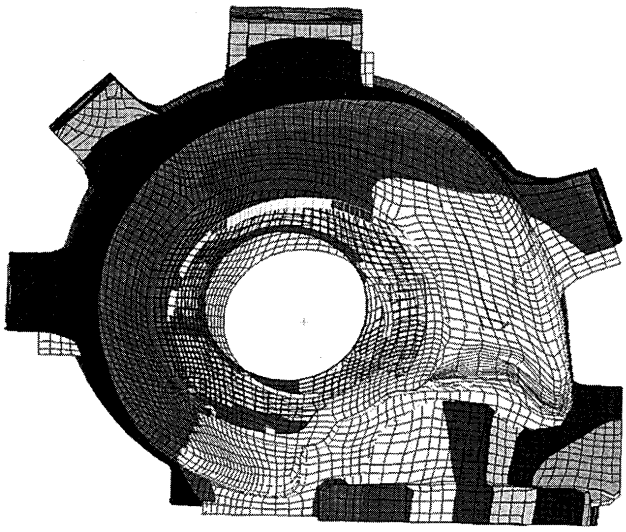


図 14　熱変位計算結果（ヘキサメッシュ）

分割の粗さを変えて 3 種類について比較する。解析の諸元を以下に示す。

形　　状：100×10×10 mm
ヤ ン グ 率：20,000 kg/mm^2
ポ ア ソ ン 比：0.3
境界条件など：左端面を固定し，右端面に集中荷重 100 kg

表 2 に解析結果をまとめて示す。テトラメッシュ 1 次要素の結果は，応力，変位共に理論解との差異が大きく，分割をかなり細かくしても精度的に難がある。また，本来は同一の値を持つべきである曲げ応力の最大と最小の値もばらつくことがわかる。

一方，テトラメッシュ 2 次要素はかなり粗い分割であるにもかかわらずヘキサメッシュ 1 次に比べて同等以上に良好な結果を示し，この種の課題に対して十分な実用性を持つと判断できる。

表 3 にテトラメッシュとヘキサメッシュの比較を示す。一般にヘキサメッシュとテトラメッシュを比較した場合，

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

表1　解析結果

要素の種類	最大ミーゼス応力（kg/mm²）	最大変位（mm）
テトラ　1次	80%	99%
ヘキサ　1次	100%	100%

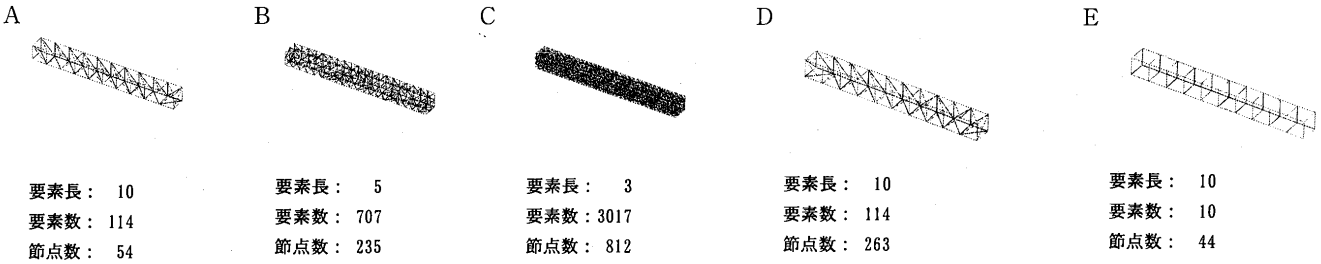


図15　テトラメッシュ1次要素　　図16　テトラメッシュ2次要素　　図17　ヘキサメッシュ1次要素

表2　解析精度の評価（片持ばり）
MSC/NASTRANによる解析

	要素の種類	応力 解析結果 最小	応力 解析結果 最大	応力 理論解 最大応力	最大変位 解析結果	最大変位 理論解
A	テトラ1次	-17.3	10.9	60.0	0.66	2.00
B		-45.9	37.3		1.20	
C		-56.7	54.5		1.71	
D	テトラ2次	-61.3	61.7		2.01	
E	ヘキサ1次	-57.2	57.2		2.02	

表3　テトラメッシュとヘキサメッシュの比較

	ﾒｯｼｭ作成の容易さ	Mesh Control（ﾒｯｼｭ形状を考慮した粗密、要素数等）	非線形解析への適用	計算精度	ﾓﾃﾞﾙ作成時間	計算時間	設計ﾓﾃﾞﾙの入手～解析結果までの時間
TetMesh	◎（Automeshによる）	×	△	△	○	△（高次要素を使用の場合×）	○
HexaMesh	×（ﾌﾞﾛｯｷﾝｸﾞ必要）（KUBRIX△ or ○）	○	◎（特に接触問題）	○	△	○	△

ヘキサメッシュの方が精度が良いと考えられる。上記のように簡単なモデルでヘキサメッシュとテトラメッシュを同じ要素サイズで作成し，応力計算した結果を理論値と比較すると，ヘキサメッシュの方がテトラメッシュより理論値に近くなり，テトラメッシュの方が応力値が小さくなる。

テトラメッシュで精度をあげるには更に細かいメッシュを作成するか，または，二次のテトラメッシュを使用して節点数を増やす必要がある。このことにより計算時間およびメモリの増加，データサイズの拡大が生じる。

6．今後の課題

1）データ交換の容易性と完全性

現状では複数の設計用CADと解析ツール間をまたがることが避けられない状況にある。機種によらない中立なフォーマットであるSTEP等によりソリッドモデルの変換が簡単に確実にできることが必要である。

2）少ない操作で簡単に使えるツールの提供

最終的には設計者が自分で解析をやるようになるので，なるべく少ない操作で簡単に行えるようにする必要がある。プリポストにしろCADにしろ，多くの機能が付いているが，設計者には使いこなせない。機能は落とさないで軽く動くソフトが必要である。

3）実験結果との検証

解析を標準化するためには，実験結果との比較から境界条件設定についてのノウハウを蓄積することが必要である。ここで重要なのは，マクロな設計評価を目的とした解析条件設定を行う点である。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/22.

そのために，実験結果を解析条件へフィードバックし最適解を迅速に導くツールが必要である。

4）処理スピードの向上

現状では処理中の待ち時間がまだ多い。設計で何回も解析を行うためにはより一層の高速化が必要である。

5）非定常問題の連成解析が可能なツール

車両用過給機のような回転機械では，いつも同じ回転速度で，同じ条件で運転されることはまずあり得ない。定格回転数で回ったり，アイドリングのような低速回転の状態もある。トランジェントの状態というのは，変形や応力などが問題になるので，そういった問題も連成解析で解けることが必要となる。

7．展望

三次元CAD活用による設計プロセス合理化の一環として，計算格子自動生成の適用による熱流体解析の効率化を行った[6]。その結果，設計業務へ適用する上で重要な条件となる短時間での解析実行を可能にすることができた。

この結果を踏まえて，三次元CADと熱流体解析及び構造解析の融合をさらに促進し，設計業務への有効活用を図る必要がある。

図18に従来の熱流体解析と熱応力解析の解析プロセスを示すと共に，今後の解析プロセスを提案する。解析の効率化を図るために，最適化手法を取り入れることが，今後のテーマである。

8．おわりに

二次元設計から三次元設計へと製品開発の流れが大きく変ろうとする中で，各種解析の持つ役割は非常に大きい。これら解析のレベルが上がり，従来専門家の手の中にあったものが設計者へと徐々に移行していくことに

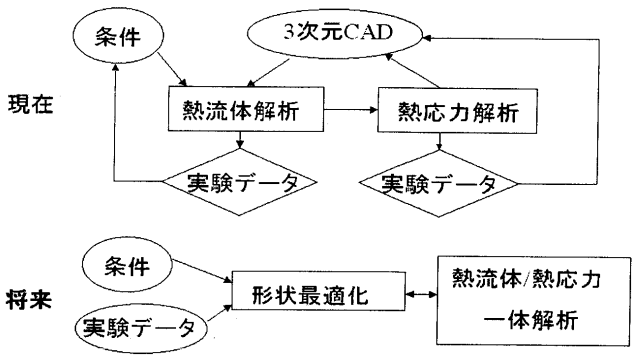


図18　回転機械における熱流体解析と熱応力解析の展望

よって，真の物づくりの変革がなされると考える。今後のCAEのさらなる発展に寄与すべく努力したい。

参考文献

(1) 岡村一徳：V-CALSデジタルプロセス実証実験 CALS EXPO INTERNATINAL，1997年11月，pp.5－12

(2) 間宮尚久，中鉢実則：エンジン開発における三次元CADの適用，自動車技術 Vol.51，1997年12月，pp.50－56

(3) 小尾幹男，大北明弘，武井伸郎，松浦奈津子：過給機開発における三次元CADの適用，石川島播磨技報，第38巻第5号，1998年9月，pp.324－328

(4) 小尾幹男，武井伸郎，松浦奈津子：過給機における熱流体と熱応力解析の連成，石川島播磨技報，第39号第3号，1999年5月，pp.167－171

(5) RICHARD H. MACNEAL : FINITE ELEMENTS: THEIR DESIGN AND PERFORMANCE, MARCEL DEKKER, INC., 1994年

(6) 小林　健，高波　功，小尾幹男，武井伸郎：三次元CADデータ利用による流体数値シミュレーションの設計ツール化，石川島播磨技報，第39巻第2号，1999年3月，pp.79－82

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2021/09/21.

ガスタービン基礎講座

―ガスタービンと伝熱工学（1）―

吉田　豊明[*1]
YOSHIDA Toyoaki

1．まえがき

ガスタービンは燃焼ガスのもつ熱エネルギーを回転エネルギー（発電，車輪やプロペラの駆動）や運動エネルギー（高速ジェット流による推進）に変換する熱機関であり，エンジン内部の流れは往復動エンジンが周期的であるのに対し，連続的な作動をする。燃焼器やタービン翼，およびその周辺は常に高い温度のガス流にさらされるので，十分な耐熱性を有することが大変重要である。

ここでは，ガスタービン高温化の意義，高温部材の各種冷却方法，部材温度の伝熱解析に関する基礎を述べ，次回に冷却設計の具体的な手法を述べる。

2．ガスタービンの高温化

燃料のもつ熱エネルギーのうちエンジンの出力として取り出されるエネルギーの割合を熱効率といっている。タービン部に流入する燃焼ガスの温度（タービン入口温度：TIT）を上昇させると出力が増大し，熱効率が向上する。このため，ガスタービンの高温化はその発祥の時代から常にキーテクノロジーとして重要な課題とされてきた。[詳しくは講義シリーズ第1回（Vol. 27　No. 1, 1999. 1）などを参照]

図1はタービン入口温度の年代にともなう変遷を示す。○印は航空用ガスタービンエンジン，□印は発電用ガスタービンである。航空用エンジンでは初期のころのターボジェット，ターボプロップからターボファン（白抜き○印），アフタバーナーつきターボファンなど種々のエンジン形式を含んでいる。この図は耐熱材料や冷却技術およびこれらを支える加工技術の進歩を中心に様々な技術の総合的な成果を反映したものであり，TIT は年間約 20℃ のペースで上昇してきたことがわかる。現在の

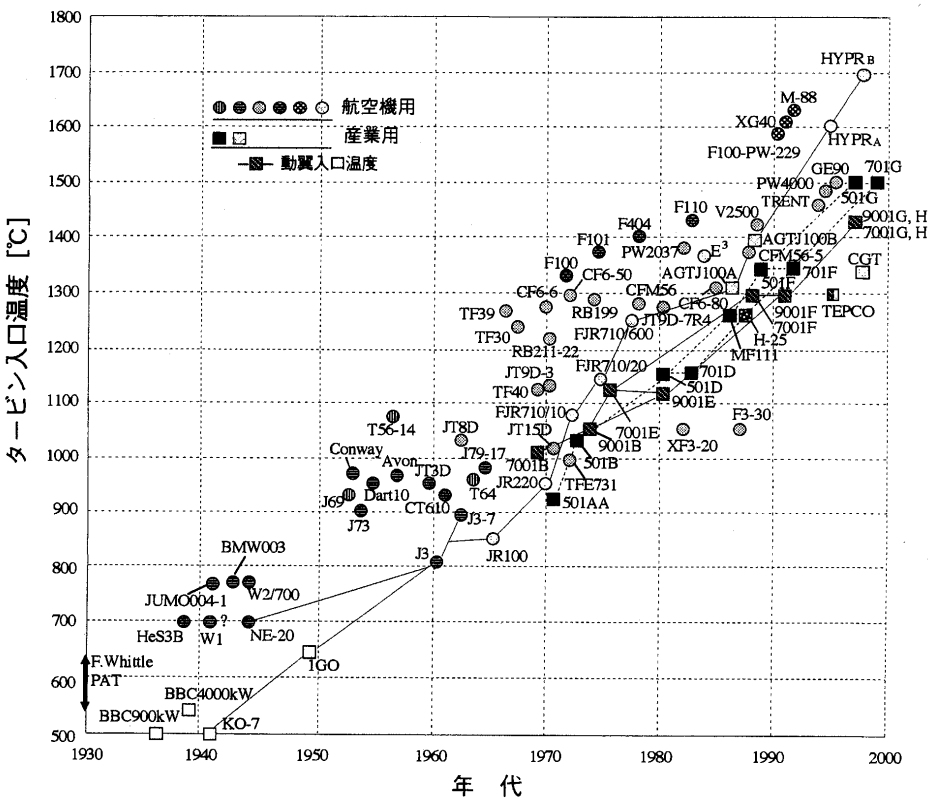


図1　タービン入口温度の変遷

原稿受付　1999年10月1日

＊1　航空宇宙技術研究所 航空推進総合研究グループ
〒182-8522 調布市深大寺東町 7-44-1

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

実用技術での最先端レベルは，航空用大型エンジンで約1500℃（GE 90），発電用大型ガスタービンでも1500℃（501 G）であり，さらに超高温化を目指して研究開発が進められているエンジンもある。

図2は飛行機が離陸，上昇，巡航，降下，着陸する一連の過程においてタービン入口温度がどのような経過をたどるかを代表的なターボファンエンジンについて示したものである。TITが最高値に達するのは，離陸する時，着陸直後ジェットを逆噴射してブレーキをかける時であり，両方を合計しても数分のオーダーである。時間的に圧倒的に長い高空での巡航時にはTITは150～200℃低い。ただし，周知のようにこのサイクルは頻繁に繰り返される。これに対し，発電用ガスタービンでは電気の使用量（負荷）に応じて作動をさせるが，最大出力を持続させたいわゆるベースロード運転では，1年の単位（10000時間のオーダー）で連続して最高のTITを保持することになる。このように航空用と産業用の使用形態は著しい対比をなしている。

2．冷却技術

2.1　高温材料の温度（冷却効率）

高温化を進展させるためのキーテクノロジーは，耐熱材料技術（講義シリーズ第10，11回　2000.7，11予定）と冷却技術である。耐熱材料にはこれまで金属の超合金が適用され，たゆまぬ開発，改良により，その耐熱性は1000～1100℃に達しているが，図1にあるようにTITは現在金属系の溶融温度を超えている。これを実現しているのは冷却技術である。図3はタービン部において冷却空気がどのような経路をたどってタービン翼や周辺を冷却しているかを示す一つの例である[1]。

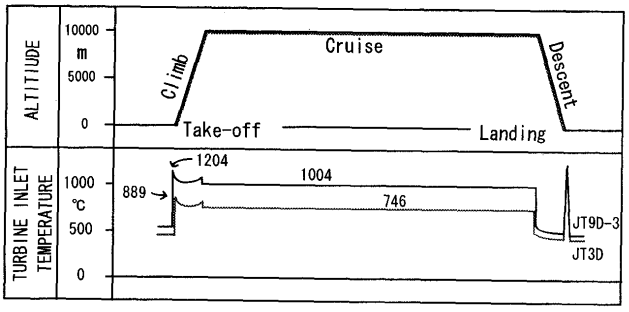


図2　ジェットエンジンのTIT履歴

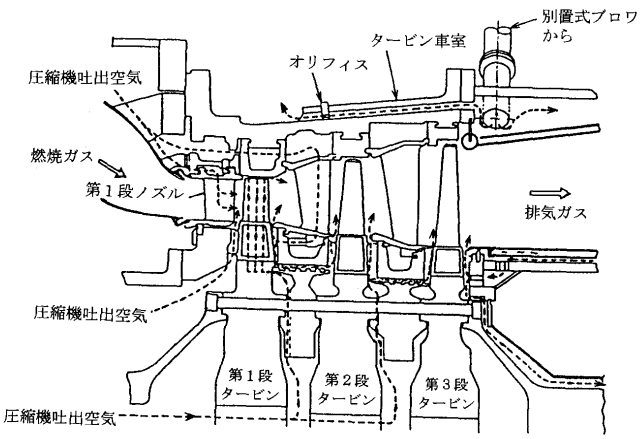


図3　高温タービン部の冷却空気経路

ガスタービンの冷却空気は必要な圧力レベルに応じて圧縮機の中間や出口部から抽気される（図の圧縮機吐出空気）。産業用ガスタービンでは冷却空気用として別のブロワーが使われることもある（図の別置式ブロワ）。最も冷却を必要とする部分は燃焼器出口（図の燃焼ガス）の第1段ノズル（静翼）であり，次に第1段タービンの動翼である。冷却空気は回転部にも供給しなければならないが，主流の高温燃焼ガスが周辺部に侵入しないように回転体と静止部をシールする役目もきわめて重要である。すべての冷却空気は最終的には主流に混入する。冷却空気の質量流量は全体として圧縮機出口のそれの15～20%にも達する。この大量の冷却空気は，圧縮機での仕事の一部を無駄にすることから熱効率の低下を引き起こす。ただし，主流に戻ってからはタービンの仕事に寄与するため，全て無駄になるわけではないが，混入時に主流ガスの温度低下を伴うため，極力少なくする必要がある。

さて，図4は，タービン翼，燃焼器ライナーなどを局所的に取り出した固体壁部分について，外表面側に高温ガスが流れ，これを冷却するために反対の内表面側に冷却空気を流す場合の熱流と温度場を模式的に表す。このような温度場において固体壁がどの程度冷却されているかを表す指標，すなわち冷却効率（η）が次のように定義されている；

$$\eta=(Tg-Tw)/(Tg-Tc)$$

冷却の効果が極端に大きく，その究極的，理想的な場合は$Tw=Tc$であり，$\eta=1$となる。一方，冷却空気を供給しないで，材料の熱伝導率が低く，極端には断熱的である場合は$Tw=Tg$であり，$\eta=0$となる。よって，実際の冷却効率は$0<\eta<1$である。

冷却の効果は，その方法によらず，冷却空気流量が多いほど高い。図5は板壁状のタービン翼外被や燃焼器ライナーによく適用される冷却方法について，冷却空気流

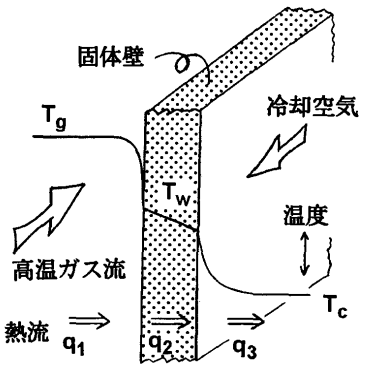


図4　高温部材の伝熱様式

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

量と冷却効率の関係を表したものである[2]。横軸は主流高温ガスの質量流量（Gg）に対する冷却空気の質量流量（Ga）の比，すなわち冷却空気流量比（β）で示してある。冷却効率の定義から明らかなように，$\beta=0$ では $\eta=0$ となるべきものである。同じ冷却空気流量でも冷却方法によって冷却効率は異なるが，少ない冷却空気で高い冷却効果が得られる冷却方法が明らかに望ましい。現在の実用的な技術では，最高 $\eta=0.8$ 近くまで可能であるが，この時に必要な冷却空気流量比は 7～8％にもなる。また，冷却空気量の増加に対して，冷却効率の向上も頭打ちになる。冷却空気をたくさん消費するほどタービン入口温度を上げる意義は失われるので，熱効率と比出力などを総合的に判断した上で冷却効率を選定すべきである。図中にある様々な冷却方法については次節で説明する。

2.2　冷却の方法

タービン翼の冷却構造，冷却方法について代表的なものを図 6 に示す。(a)の内部対流冷却方式（Convection Cooling）は翼内に多数の丸穴を設けたり，冷却室を設け，フィン，突起，棚などにより対流伝熱の増進をはかったものである。図 5 に示すように，この冷却方式による冷却効率は相対的に低い。1960 年頃最初に実用化された中空翼はこの方式であり，以後ガス温度の上昇ペースが飛躍的に高まった（図 1 参照）。(b)のインピンジ冷却（衝突噴流冷却，Impingement Cooling）は翼内部に設けた隔壁や挿入筒（インサート）に多数の小さい穴をあけ，そこから噴流を出して翼外被（シェル）の内面にぶつけて冷却を行うものである。広い意味では内部対流冷却の一種であり，冷却効率を部分的に高くすることができるので，熱負荷の高い前縁部の冷却によく適用される。対流冷却，インピンジ冷却において消費された冷却空気は翼の先端部や後縁部からスリット，小孔群などを経由して主流高温ガス流中に混入される。(c)のフィルム冷却（膜冷却，Film Cooling）は翼外被に小さい穴やスリットを設け，内部から翼外面へ冷却空気を吹出し，膜状に壁面を覆うことによって高温ガスから熱の流入を低減させるものである。図 5 に示すように，フィルム冷却は前の対流冷却，インピンジ冷却に比べて高い冷却効率を得ることができる。インピンジ冷却，フィルム冷却ともに 1970 年頃には実用化されており，以後冷却翼は一般にこれら 3 種の冷却方式を巧みに組合わせるようになった。フィルム冷却を翼表面全体にわたって適用する形式を全面フィルム冷却（Full Coverage Film Cooling）といっている。1980 年代になって，エンジンの高効率化がますます叫ばれる一方，ガス温度は既に耐熱材料の溶融温度領域に達していることが背景にあって，多量の冷却空気が必要であるにもかかわらず，全面フィルム冷却翼が用いられるようになった。現在でも実用技術としてこの傾向は続いている。フィルム冷却では冷却空気が主流高温ガスの翼間流れに混入していくから，例えば翼外表面の境界層を層流から乱流に遷移させることなど，空気力学的な性能に影響を及ぼす度合が強いので冷却効率特性のみならず，空力性能特性にも注意しなければならない。(d)のトランスピレーション冷却（しみ出し冷却，Transpi-

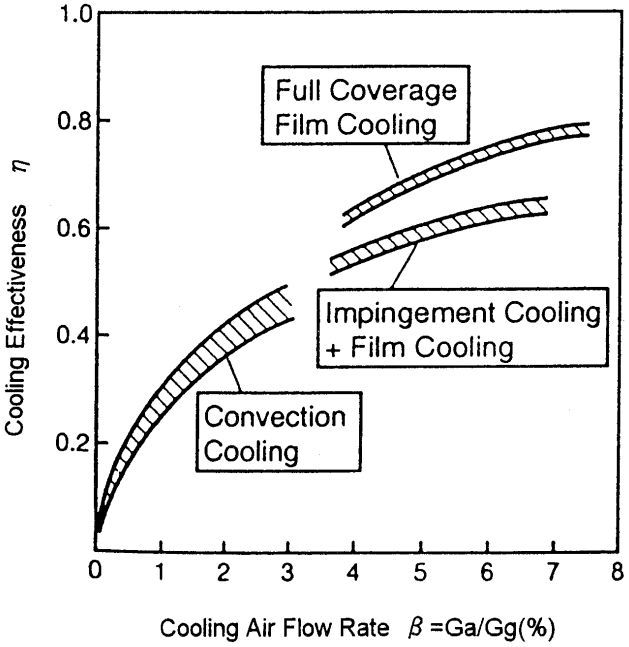


図 5　冷却空気流量と冷却効率

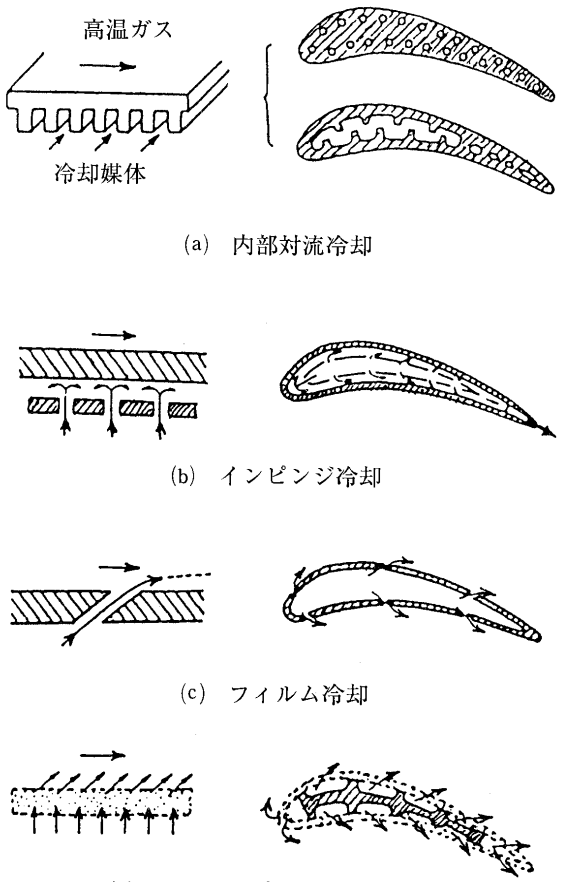
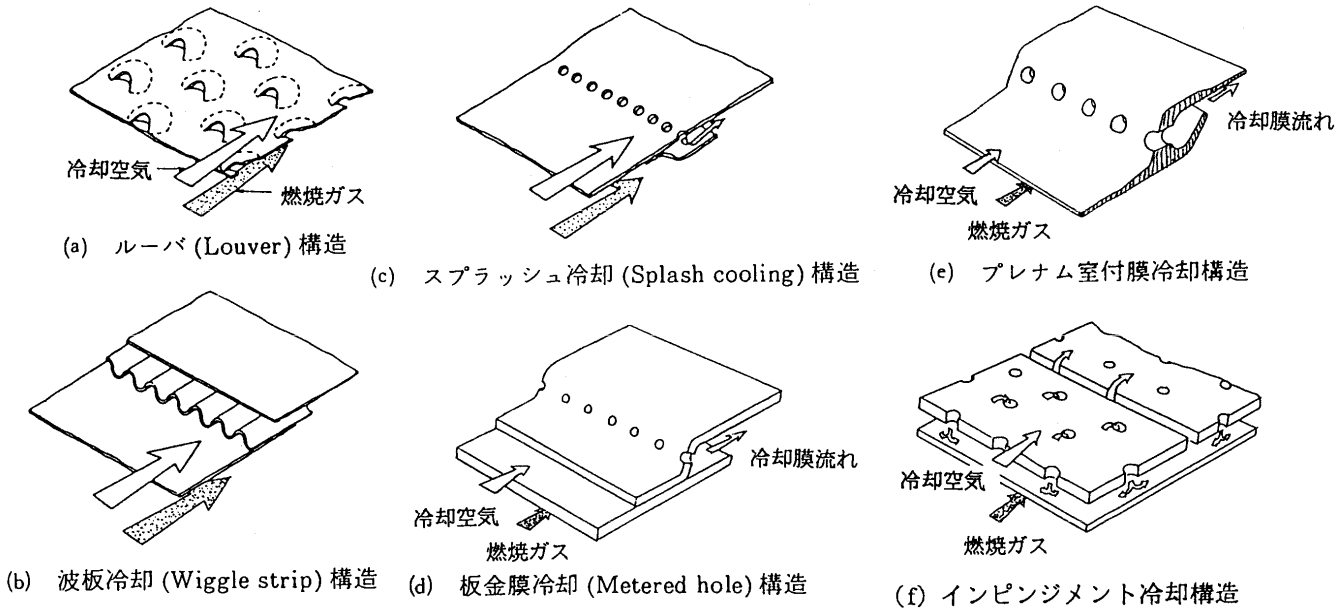


図 6　タービン翼の各種冷却方法

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/



(a) ルーバ (Louver) 構造　(c) スプラッシュ冷却 (Splash cooling) 構造　(e) プレナム室付膜冷却構造

(b) 波板冷却 (Wiggle strip) 構造　(d) 板金膜冷却 (Metered hole) 構造　(f) インピンジメント冷却構造

図 7　燃焼器ライナーの各種冷却構造

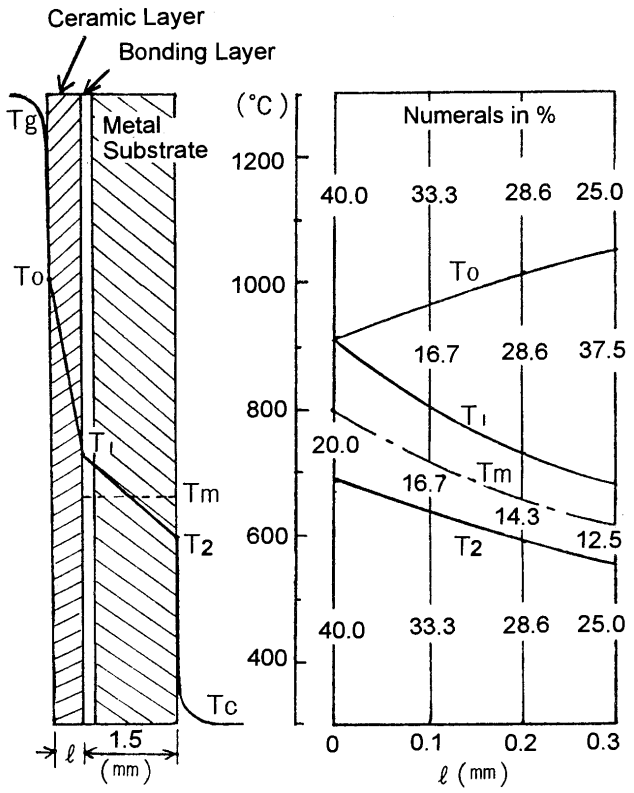


図 8　遮熱コーティングによる翼材料温度低下の効果

ration Cooling）は金網や焼結材料など多孔質の材料で翼外被を構成し，微細な隙間から冷却空気をしみ出すことによって，薄くて切れ目のないフィルムを形成して高い冷却効果を得るものである。フィルム冷却の効果を最大限に獲得する概念であり，冷却効率は最も高い。しかし，冷却空気中に含まれ，除去の難しい微細なゴミで翼外被は目づまりを起こす。また，翼外表面側の主流は翼の各部で流速，圧力が異なるが，これに対応して過不足なく冷却空気を配分することが大変難しい。この二つの問題を克服する技術はまだないので，トランスピレーション冷却は実用になっていない。

ガスタービンの燃焼器内では局所的に 2000℃ を超える高温ガス流が連続的に発生しており，これを囲む円筒状の燃焼器ライナーに設けた空気孔から希釈空気を供給して，燃焼器の出口，すなわちタービン入口でタービン翼が耐える温度（＝TIT）になるようにしている。燃焼器ライナーは最も高い温度環境にさらされる部材であり，希釈空気孔のみならず，周到な冷却を必要とする。構造として大きな円筒状になるため耐熱合金製の板金で製作されるのが一般的である。図 7 に各種の冷却方法を示す[3]。(a)～(e)まではフィルム冷却の様々なバリエーションであるが，タービン翼のフィルム冷却と異なり，フィルム冷却孔の後流に空気溜め的な空間を設けスリット状の出口を形成してきれいな膜状の冷却空気を燃焼ガス側へ出すことが比較的容易にできる。(f)はインピンジ冷却構造である。製作加工技術の進歩により比較的大型の円筒／層状パネルが開発されて，冷却空気の消費を節約しながら，冷却効率のきめこまかい分布を与えることができるようになった。

上記の様々な冷却方法は，冷却空気を用い，積極的に高温部材を冷却するもの（Active Cooling）である。これとまったく別の発想で，熱流を通しにくい材料（断熱材，遮熱材）を高温部材の表面に貼りつけ，高温ガス流から構造部材を保護する技術（Passive Cooling）がある。これはセラミック遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating）と称され，燃焼器ライナーやタービン部には既に実用技術として適用されている[4],[5]。

図 8 は遮熱コーティング膜を金属基材の表面に施工したとき，各部の温度がどのようになるかを，標準的な境

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

界条件について示したものである。遮熱材のセラミックとしては，イットリアを約 8％含んだジルコニアが現在使われている。これの熱伝導率は超耐熱合金の 1／15 程度であり，セラミックス中でも最も低い部類に属する。セラミック層と金属基材表面の中間には，通常コーティング層が剥がれにくいように中間層（Bonding Layer）が設けられる。これには熱膨張率が両者の中間的な値で，耐熱合金の成分に近い材料が使われる。熱伝導率も両者の中間にあるが，図の例では簡単のために金属基材と同じとしてある。したがって，図中の T_1～T_2 で示した部分が金属部であり，T_m はその平均温度である。セラミック遮熱層の最外表面温度は T_0 である。セラミック層の厚さを 0 から 0.3 mm まで厚くしていくと，金属部の温度は下がっていき，0.3 mm ではセラミック層がない場合に比べて平均温度で約 170℃ も低くなっている。これは金属材料の耐熱性をそれだけ高めたことと同じであり，大変意義がある。ただし，このとき最外表面温度 T_0 は逆に上昇する。セラミック層は，高い構造強度を必要とはしないが，耐酸化性，耐熱性の点で許される限度以下にとどめなければならない。ジルコニアでは，この上限は約 1200℃ レベルとされている。遮熱コーティングは，このように大変望ましい金属部温度低下の効果をもたらすが，衝撃，酸化，繰返し応力などにより剥がれてしまうと大変危険な状態に陥る。それゆえ，予定される作動条件と稼働時間内において，剥がれないような施工技術を確立することが重要である。ただし，剥がれても，下地の金属部がある程度の時間耐えられるような作動条件において遮熱コーテイングを使えば，それはプラスアルファの効果として耐久性や信頼性の向上に多大な寄与となる。

近年，剥がれにくい遮熱層の技術として傾斜機能材料（Functionally Graded Materials）という概念が考案され，基礎から応用まで幅広く研究が進められている[6]。図 9 に FGM の構造と機能の概念を示す。高温部材の耐熱性を高めるための遮熱材料としての傾斜機能材料では，高い熱負荷のかかる外表面側にセラミックスを配し，他方の内部表面側には構造強度の強い金属を配する。外表面から内表面に向けてセラミックスの成分比を徐々に減らし，逆に金属の成分比を多くする。中間層では遮熱性と構造強度上望ましい第三の成分（図では繊維，マイクロポア）があれば，これも成分比が厚さ方向に連続的に変るように合成する。成分比のみならず，微細構造についてもそれぞれ適したものとする。このように配備した傾斜機能材料は，これまでの遮熱コーティング層のようにはっきりとした層の境界がなく，発生する熱応力が低くとどまるような成分比，微細構造を設計できるので大変優れた遮熱構造を構成できる。一部の機種で実用化しているものもあるが，今後の技術向上が期待される。

2.3　温度の解析

燃焼器，タービンなど高温部材の冷却構造を設計する際には，寿命，出力，熱効率などの基本性能を満たすために，用いる材料の耐用温度（強度と時間，繰返し使用回数などの関数），実現可能な冷却効率，タービン入口温度，冷却空気の流量と供給温度など互いに関係する因子を何回も繰返し確認しながらその解を求める。これらの作業において，部材の温度を求めることは必須の手続きである。図 4，図 8 で理解されるように，高温部材の温度解析は，ガス流の温度と熱伝達率を与える第 3 種の境界条件のもとで熱伝導を解析することであるから，流れの解析に比べ格段にやさしい。問題は，いかに適切な境界条件と物性値を与えるかにある。具体的な手順については，次回個々の冷却方法について解説する。

ここでは，例として翼外表面の熱伝達率分布（hg）を図 10 に示す[2]。この図は実験による測定値と層流／乱流境界層の熱伝達率式を引用した場合の計算値の両方を示している。このような翼形状や高温ガスが流れる各種部材の外表面側の熱伝達率については実験や数値計算による予測が数多く研究されている。一方，内表面側の熱伝達率（hc）についても広範に実験研究が行われているが，前節で述べたように，冷却構造は複雑，多岐にわたり，所要の形状について熱伝達率を適切に評価すること

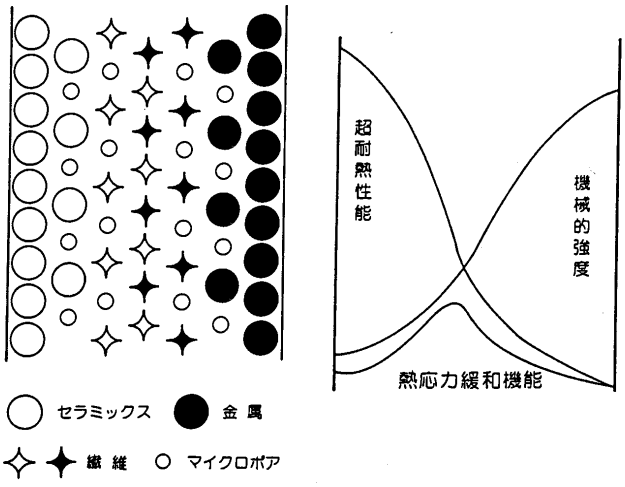


図 9　傾斜機能材料の構造と機能の概念

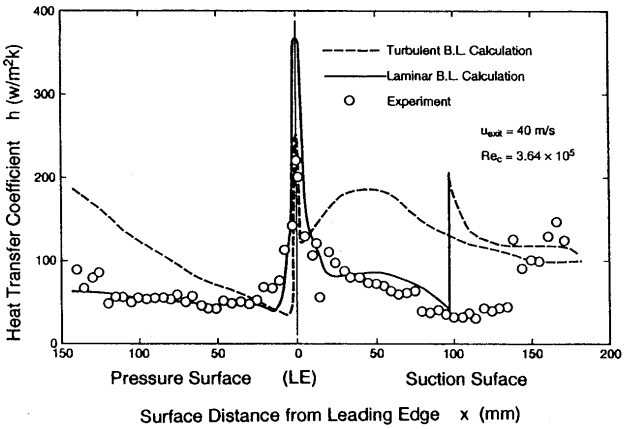


図 10　タービン翼外面の熱伝達率分布

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/22

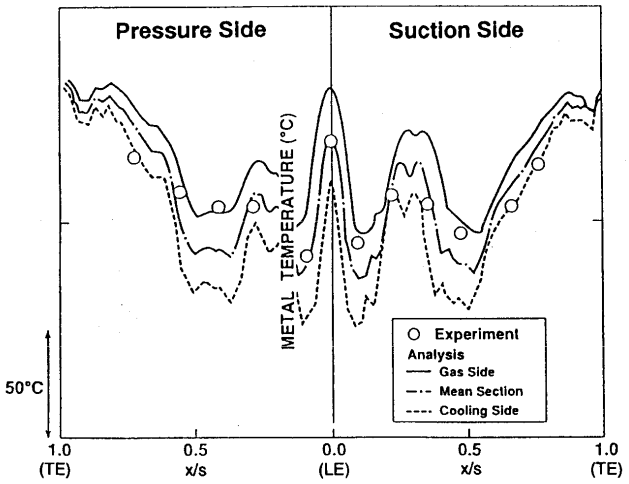


図 11　翼材の温度分布（実験と数値解析）

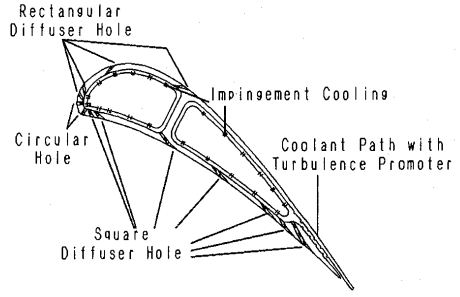
は，一般に容易ではない。図 11 は，図 10 の研究において発表されたガスタービン動翼の翼外被の温度分布であり，数値解析結果と実験による測定値が比較されている。計算値と実測値がきわめて良い一致を示しており，優れた予測がなされていることがわかる。

翼内部の冷却空気通路やフィルム冷却孔における流れの数値解析は，近年の数値解析技術，コンピュータ技術の発達により，研究例が多くなってきているが，相対的な傾向が実験値とよくあうケースもあるといった段階であり，実験検証値により何らかの補正を試みるというのが実状であると思われる。

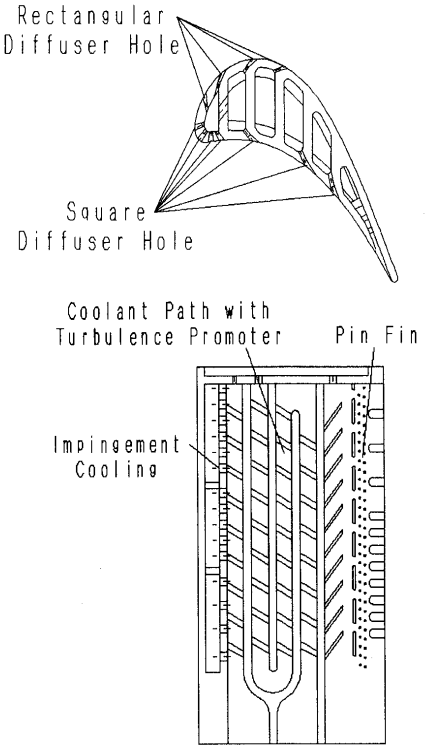
しかしながら，数値解析は結果として流れ場，温度場が空間的に時間的に詳細にわかる。これらは実験計測では不可能な場合が多い。また，形状，流れの条件などを少し変えた場合についても容易に結果が得られ，実験は必要最小限で済むことになる。さらに強度計算へ移行するための準備が整うことになる。数値解析を設計手順の一環として導入することは，設計技術の飛躍的な高度化を意味するものであり，今後の発展が大いに期待される。

2.4　最新の冷却翼

冷却技術の発展を踏まえ，現在最先端にある冷却翼の構造例を図 12 に示す[7]。これは日本の国家プロジェクト“超音速輸送機用推進システム”で研究開発されたエンジンのタービン翼であり，タービン入口温度は 1700℃レベルである（図 1 中の $HYPR_B$）。フィルム冷却のうちディフューザーホールとあるのは，冷却孔が出口に向かって末広がり状の通路となっているもので，従来の丸穴よりも優れた冷却性能を示す。製作技術の進歩により近年取入れられるようになってきた。翼の後縁部や動翼の中央通路部に乱流促進体流路とあるのは通路の壁に多数の小さい突起や棚状の段をつけたもので，冷却空気流れの乱れを増進させて高い熱伝達率を得るための構造の一種である。同じ目的で動翼後縁部には多数のピンフィンが設けられている。動翼中央部には，上下方向に流れ，折り返しのある通路（サーペンタイン流路）が設けられ



(a)　静翼

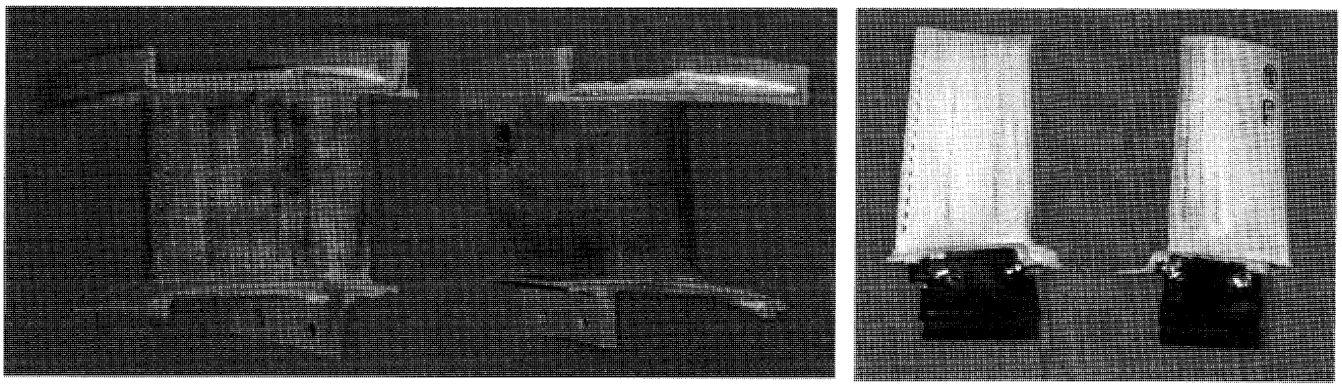


(b)　動翼

図 12　最新のタービン翼冷却構造模式図

ている。この部分は前縁部や後縁部に比べて翼外表面側の熱伝達率が低いので（図 10 参照），冷却空気通路を長くしてその消費量を節約する。図 13 は実験検証用エンジンのために実際に製作された翼の外観を示す。静翼では，前縁部のシャワーヘッド（全面フィルム冷却），腹側の全面フィルム冷却，背側のディフューザーホール出口などを確認することができる。また，動翼ではフィルム冷却孔出口，後縁部吹出し口が見られる。静翼，動翼ともに材料には単結晶材（CMSX－4）が用いられている。冷却空気流量と冷却効率の設計値は，静翼，動翼でそれぞれ 7.5%，0.65 および 5.4%，0.62 となっており，高温翼列実験でその性能が予め確認され，実証エンジンでも検証された。ここに示した冷却翼は，各種冷却方法の組合わせ，素材，冷却空気流量と冷却効率など，いずれも現在の最先端技術に共通する特質を表していると考えてよい。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/05/21.



(a) 静翼　　(b) 動翼

図 13　最新のタービン翼外観

3．あとがき

ガスタービンの冷却技術に関し，近年の特筆すべき動向は，“少ない冷却空気流量でも高い冷却効率の得られる高度な冷却構造を追求する”，“蒸気，水素など異種流体を冷却媒体として燃焼器，タービン翼を冷却する”という動向であり，特に蒸気冷却は産業用大型ガスタービンで実用が始まっている。これらはタービン入口温度をさらに上昇させなくても，エンジンシステム全体として熱効率向上，出力増大が得られるという特質に基づいており，今後大いに進展するものと予測される。

本講義シリーズは，入門，基礎，が主旨であり，紙面の都合もあるので，概論にとどめることになった。幸い冷却技術に関して，系統的に，詳しくまとめられた資料がいくつかあるので，関心のある方はそれらを是非参照いただきたい[(1),(8)−(16)]。

参考文献

(1) 岡村隆成，日本ガスタービン学会第 9 回特別講座資料，(1994−9)

(2) Takeishi, K., Heat Transfer in Turbomachinery, Begell House Inc., (1997), 3

(3) 田丸卓，航技研資料 NAL TM−676, (1995−1)

(4) 竹田博光編，セラミックコーティング，(1988)，日刊工業

(5) 吉葉正行，日本ガスタービン学会誌 Vol. 25，No. 97，98，100，101, (1997−6，9，1998−3，6)

(6) 未踏科学技術協会，傾斜機能材料研究会編，傾斜機能材料，(1993)，工業調査会

(7) 真家孝，山脇栄道，石川島播磨技報 34−3, (1994−5), 177

(8) 能瀬弘幸，日本ガスタービン学会誌 Vol. 9，No. 33，34, (1981−6，9)

(9) 日本ガスタービン学会誌特集，高温ガスタービンの冷却，Vol. 20，No. 80, (1995−3)

(10) Arts, T., ed., Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines, Lecture Series 1995−05, von Karman Institute for Fluid Dyramics, (1995)

(11) 日本機械学会分科会報告 No. 492，P−SC 214, (1995−6)

(12) Lakshminarayana, B., Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery, Wiley Interscience, (1996)

(13) 日本ガスタービン学会第 21 期調査研究委員会成果報告書，ガスタービンの高温化と冷却技術, (1997−3)

(14) 日本ガスタービン学会誌特集，高温・高効率化の歩みと展望，Vol. 24，No. 97, (1997−6)

(15) Goldstein, R. J., Leontiev, A. I., Metzger, D. E., ed., Heat Transfer in Turbomachinery, Begell House Inc., (1997)

(16) 武石賢一郎，日本伝熱学会誌 Vol. 38，No. 148, (1999−1), 10. 10／10

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

容積型ガス発生機を有する小型ガスタービンエンジンの性能向上に関する研究

A Simulating Study on Thermal Efficiency of a Small Gas Turbine Engine with a Reciprocating Gasifier

伊藤　高根[*1]
ITOH Takane
尾崎　正幸[*1]
OZAKI Masayuki
長谷川　茂[*2]
HASEGAWA Shigeru

Abstract

This paper describes a performance analysis of a small gas turbine system with a reciprocating gasifier by using a newly developed simulation code. In this analysis, many design and operating parameters were varied and their effects on its thermal efficiency and specific power of the engine system were analyzed. Analysis showed that compressor pressure ratio, bypass ratio, turbine expansion ratio, cylinder wall temperature and intake and exhaust valve timing were the major critical parameters. By optimizing these parameters, it would be possible for the thermal efficiency of this type of engine to be over 50% without any heat exchanger.

1．はじめに

現在，大型ガスタービンは様々な分野で確固たる地位を確立しつつあるが，小型ガスタービンは大型に導入されている高温化・高圧力比化を直接取り入れることができないため，高効率化を目指すためには熱交換器を装着し，再生式とすることが行われてきた。しかし熱交換器は，小型な回転蓄熱式のものであっても容積はかなり大きくなり，高温での耐久性，信頼性，シールからの空気漏れ，コストと言った面で問題が残っている。そこで，熱交換器を用いずに大型ガスタービン並の熱効率を達成するために，原理的には高温・高圧下での燃焼が容易な容積型エンジンに着目し，これをガス発生機に用いた2軸式ガスタービンの可能性が考えられる。現在この種のガスタービンの研究は殆どなされていないが，古くは同様な原理のものとして「オリオンエンジン」，「フリーピストンガスタービン」と呼ばれるエンジンが開発された経緯があり，[(1),(2)] 理由は定かではないがその後開発は中断されている。しかしながら，最近の小型高性能空力コンポーネントの設計技術，耐熱性に優れたセラミック材料の適用技術，動弁系の制御技術，さらにはレシプロエンジンの排気対策技術等の新しい技術を導入することにより，容積型ガス発生機を有する小型ガスタービンは熱交換器無しでも大型ガスタービン以上の熱効率を達成できる可能性があると考え，筆者等はシミュレーションプログラムを新たに開発し，性能に及ぼす基本パラメーターの影響を検討してきた。[(3)] この度，50% 近い熱効率達成の可能性が得られたので，その結果を報告する。

原稿受付　1999年6月24日
＊1　東海大学 工学部
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117
＊2　スターテング工業㈱

2．検討対象システム

図1に検討対象システムの構成図を示す。過給用圧縮機とそれを駆動する容積型エンジンからなるガス発生機と，出力タービンからなるいわゆる2軸式ガスタービンである。圧縮機の形式は原理上はどのような形式のものであってもよい。

3．各コンポーネントのモデル化

3.1　過給用圧縮機部

入口状態（大気圧，大気温度），吸気系圧力損失率，圧縮機の圧力比，断熱効率を与えて，駆動仕事，出口の

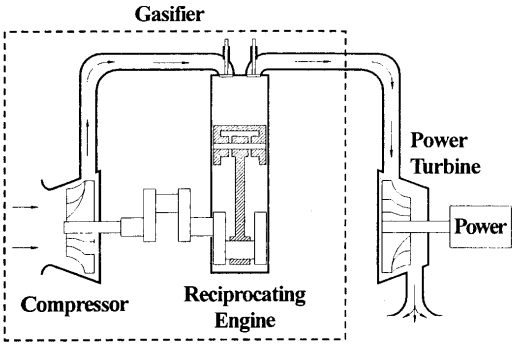


図1　エンジン構成（タイプ①）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

圧力および温度を算出する。

3.2　レシプロエンジン部

ガス発生機部は通常のレシプロ式エンジンを流用する。エンジン吸入空気の状態は過給用圧縮機出口の圧力および温度と仮定し，レシプロエンジン部の諸元（シリンダ径，ストローク，バルブ径，バルブ揚程等）を与え，タービン入口圧力を与えて通常のサイクル計算を行う。吸排気行程における弁部通過流量は喉部の面積が変化するノズルと仮定し計算するが，流量係数は実験値を参考にバルブ揚程の関数とした。また燃焼行程では熱発生率をクランク角度に対して与えるが，ここでは図2に示すようにいわゆる三角燃焼パターンを仮定した。

また冷却損失の計算は時々刻々変化するシリンダー内ガス温度，熱伝達率，壁面温度および伝熱面積より算出するが，壁面温度はほとんど変化しないので一定値として与えた。なお熱伝達率の値はEichelberg，Woschni等の式を用いた。これらの仮定の下に①質量保存の法則，②状態方程式，③エネルギー保存の法則をシリンダー内ガスに適用しシリンダー内圧力および温度に関する連立微分方程式を導出し，それをルンゲ・クッタ・マーソン法を用いてクランク角度の変化に応じて，時々刻々計算する。与えられた回転数に対し，サイクルごとの吸入空気量，仕事量，燃料供給量，ガス発生機部熱効率，空気過剰率，排気ガス量，排出エンタルピ等を算出し，収束値を求める。

3.3　出力タービン部

ガス発生機部から排気されるガスのエンタルピを入力データとし，膨張比，断熱効率を与えタービン出力および比出力を求める。タービンは排気溜を有する定圧タービンとして計算した。

3.4　性能予測シミュレーションの手順

本システムにおいてレシプロエンジン部は過給用圧縮機を駆動できるだけの仕事を発生すれば良いので，まず通過流量を1［kg／sec］としたときの過給用圧縮機駆動仕事を計算しておく。次に与えられた回転数に対してレシプロエンジン部のサイクル計算を行い，吸入空気量に見合う圧縮機駆動仕事と同じ仕事を発生する燃料供給量を求め，そのときの必要な各種特性値を算出する。さらにガス発生機より排出されたガス状態よりタービンの出力を求める。これらの結果からガス発生機部での燃料供給量とタービン部からの出力よりエンジンシステム熱効率を求め，また比出力は，吸入空気量とタービン出力より求める。

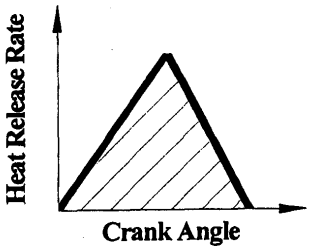


図2　熱発生パターン

4．シミュレーション結果

各パラメーターの影響を調べるため基準のエンジン諸元を表1に示す。以後この諸元の中のあるパラメーターのみを変えて，その影響を調べた。尚，具体的計算に先立ち，本プログラムの精度をチェックするため既存のディーゼルエンジンの寸法データを入力し，過給用圧縮機の圧力比及びタービン膨張比を共に1とおいてレシプロエンジン部のみの熱効率を求めたところ，既存エンジンのカタログデータに近い値が得られ，今回の目的である各パラメーターのエンジンシステムに及ぼす影響（熱効率，比出力）を解析するにはこれらの手法は妥当であると判断された。

4.1　過給用圧縮機の影響

(1)　圧力比の影響

ベースエンジンの圧力比2.5に対して圧力比を上昇させた場合の結果を図3に相対値で示す。圧力比を大きくすると圧縮機の駆動仕事が増加するのは当然であるが，タービン膨張比は圧力比に比例した値となるように与えられているためタービン膨張比も増加する。また，レシプロエンジン部が外部に行う仕事は圧縮機駆動仕事と常に釣り合うという本エンジンの特性から燃料供給量が増加し空燃比が濃くなり排気温度も上昇し，タービン仕事も増加した。その結果，圧力比を上げるとガス発生機の熱効率はそれほど変わらないがエンジンシステム熱効率は上昇し比出力は大幅に上昇した。しかしながら，圧力比の上昇は一般にはシリンダ内最高圧力の上昇を招くから，レシプロエンジンの圧縮比を下げて最高圧力を一定

表1　ベースエンジン諸元

Parameter	Unit	Value
Intake Duct Pressure Loss		0.015
Compressor Efficiency		0.81
Pressure Ratio		2.5
Compression Ratio		15.0
Bore × Stroke	cm	7.0×7.7
Intake Valve Diameter	cm	3.64
Intake Valve Lift	cm	0.91
Exhaust Valve Diameter	cm	4.37
Exhaust Valve Lift	cm	1.09
Intake Valve Closing	deg	*55.0
Exhaust Valve Opening	deg	*310.0
Intake Valve Opening	deg	*525.0
Exhaust Valve Closing	deg	*555.0
Average Wall Temperature	K	373.15
Mechanical Efficiency		0.832
Gasifier Speed	rpm	5000.0
Turbine Expansion Ratio		2.27
Turbine Efficiency		0.875
Exhaust Duct Pressure Loss		0.015

*measured　from　BDC

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

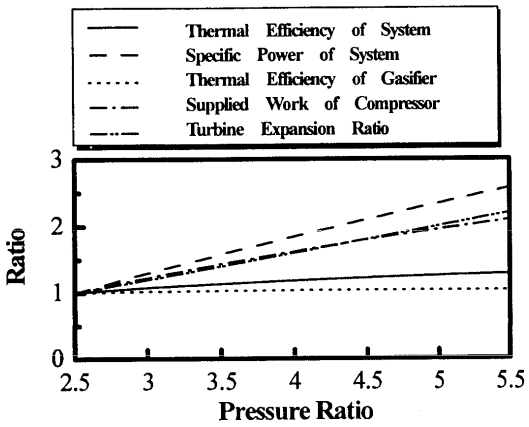


図3　圧力比の影響

限度以下に押さえておく必要がある。レシプロエンジンの圧縮比の影響については後で述べる。

(2)　断熱効率の影響

圧縮機断熱効率が高くなると圧縮機出口空気温度が低下するため圧縮機仕事が減り，燃料供給量，冷却損失も減少しタービン入口温度も低下する。そのため比出力が低下する。しかしながらエンジンシステム熱効率は向上した。

(3)　吸気系圧力損失率の影響

吸気系，サイレンサ等により吸気系の圧力損失率が増加すると，圧縮機入口圧力が減少し，それに伴い出口圧力も低くなる。しかしタービン膨張比は計算上一定としているのでレシプロエンジン部にとっては排圧が高くなるのでガス発生機部熱効率は低下した。しかしながら，燃料供給量が増加し，その一部は排気エネルギとしてタービンで回収されるためエンジンシステム熱効率はガス発生部熱効率ほど下がらなかった。

4.2　レシプロエンジン部の影響

(1)　圧縮比の影響

レシプロエンジン部の圧縮比を変化させた場合の結果を図4に示す。圧縮比の変更は，ボアとストロークは変えずに隙間容積を変化させて行った。圧縮比を大きくすると図に示すようにガス発生機部熱効率，エンジンシステム熱効率共にわずかであるが減少した。レシプロエンジン部の発生仕事は圧縮機駆動仕事と常に等しいから圧縮比にはよらず一定であるが，圧縮比増加と共に隙間容積が減少する分エンジン排気量が小さくなっており，レシプロエンジン部の負荷は増加し燃料供給量が増加し，その結果，図に示すように冷却損失が大幅に増加しエンジンシステム熱効率が低下したものと思われる。圧縮比を上げるとシリンダ内最高圧力が高くなるが，4。1(1)項で述べたように，圧力比の効果を考慮するなら，全体的には圧力比を高くし圧縮比を低くした方が有利と言うことになる。圧力比，圧縮比を変えた場合のシリンダ内最高圧力の計算結果を図5に示す。

(2)　燃焼パターンの影響

熱発生率は3.2において述べたように三角パターンを

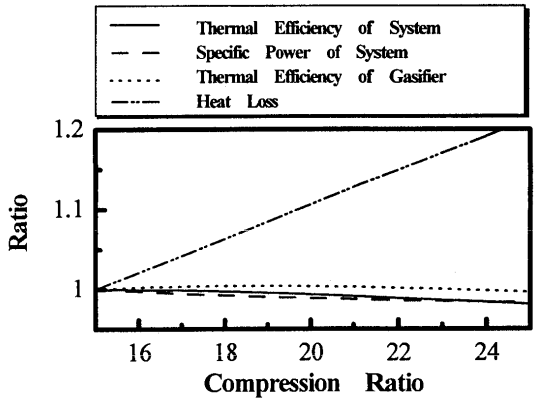


図4　圧縮比の影響

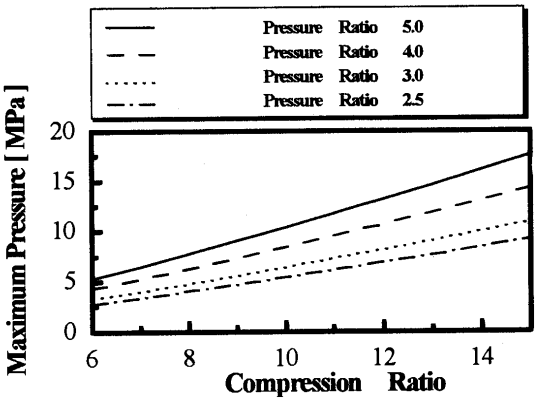


図5　シリンダ内最高圧力

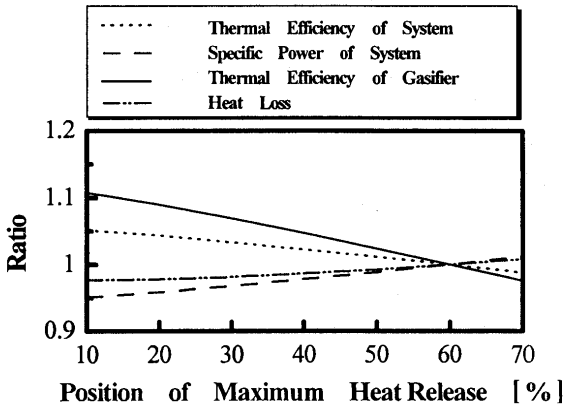


図6　熱発生パターンの影響

仮定しており，三角形の面積が1サイクル当たりの燃焼による発生熱量となるが，三角形の頂点の位置により燃焼の等容度が違ってくるから熱効率に影響を及ぼす。しかしながら本システムではガス発生機部での熱効率は2次的であり，タービンでの熱の回収を考慮すれば，レシプロエンジン部内で全て膨張しきる必要はなく，通常のレシプロエンジンに対する影響とは異なると思われる。図6に上死点で燃焼を開始し燃焼期間を60［deg］一定のまましし燃焼最大点を変化させたときの結果を示す。横軸は燃焼期間に対して頂点の位置が燃焼開始位置から何%のところにあるかを示しており，この値が小さいほど等容度が大きい場合に相当する。等容度が小さくなるほ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

どガス発生機部熱効率，エンジンシステム熱効率は悪化するが，比出力は大幅に増加することがわかった。

(3) 燃焼開始時期の影響

燃焼開始時期を上死点（180［deg］）から遅らせた場合の結果を図7に示す。開始時期が30［deg］以上遅くなると，ガス発生機内の最高温度は上昇し，それに伴って冷却損失が増加するためにガス発生機部熱効率は低下した。しかし，高温な排ガスが得られ，タービン部での出力が増加し，比出力は増加し，エンジンシステム熱効率はガス発生機部ほどではないが低下した。

(3) 吸気弁閉じ終わり時期の影響

圧縮始めのクランク角度の影響を見るため吸気弁の閉じる位置を変えて計算を行なった。結果を図8に示す。ベースの下死点後55.0［deg］より早めると主としてポンピングロスと冷却損失が減少するため多少熱効率が改善され，下死点手前10.0［deg］程度が最も良かった。

(4) 排気弁開き始め時期の影響

排気弁の開き始めの時期を変化させた時の結果を図9に示す。排気弁を早く開くことにより排出されるガス温度が上昇しタービン出力が増加すると考えられた。早く開けすぎると膨張仕事が減ってしまうためガス発生機部熱効率は大幅に減少するが，タービンで排気エネルギが回収されるためエンジン全体の効率の減少はガス発生機部ほどではない。下死点手前30（330.0)［deg］くらいが最適であり，そこからずれるとポンピングロスが増加するため熱効率が悪化することが明らかとなった。その他，吸排気弁の開閉時期によって逆流が生じている場合があり，これが効率等の低下を招いていると思われたために，その時期を変化させてみたがさほど変化はなかった。結局，元のベースエンジンの値が最適値に近かった。

(5) 壁面平均温度の影響

通常のレシプロエンジンでは燃焼室の壁面を遮熱し冷却損失を減らしても排気エネルギが増えるだけでエンジン熱効率はそれほど上がらない。しかしながら本システムではレシプロエンジン部の排気エネルギをタービンで回収するシステムであるから遮熱の効果はかなり期待できると思われる。そこで遮熱の効果を調べるため，燃焼室壁面平均温度を順次高めることによりその影響を計算した。結果を図10に示す。壁面平均温度の上昇とともに冷却損失が減少し，それに連れてエンジンシステム熱効率，比出力ともにが増加し，比出力の改善効果が大きいことがわかる。なお738.15［K］のとき，理論的に冷却損失0となり，これ以上壁面平均温度は高くならない。

4.3 タービン部の影響

(1) タービン膨張比の影響

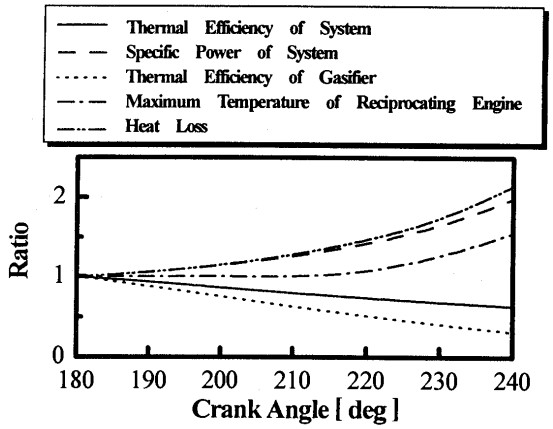


図7　熱発生開始時期の影響

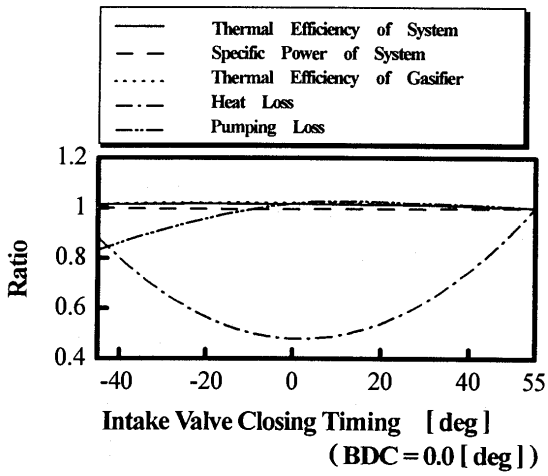


図8　吸入弁閉じ初め時期の影響

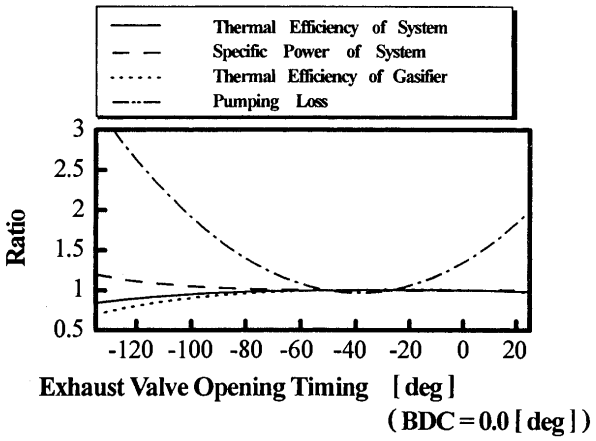


図9　排気弁開き初め時期の影響

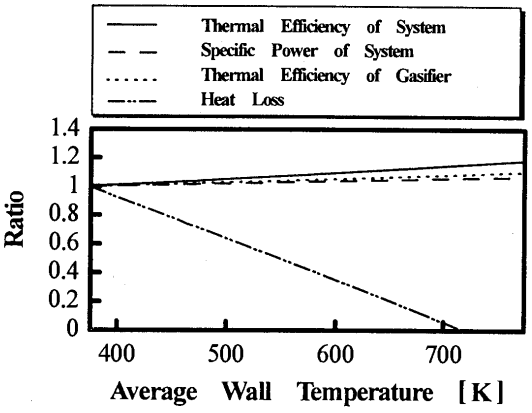


図10　壁面平均温度の影響

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/23

通常のエンジンでは，吸排気バルブのオーバラップ期間があるためタービン膨張比は圧縮機圧力比より低くなければならない。ベースエンジンではタービン膨張比／圧縮機圧力比を仮に2..27／2.5としているが，圧力比を一定としてタービン膨張比のみを高くしてその影響を調べた。この時“圧力比＞タービン膨張比”の関係が成り立つ範囲でタービン膨張比を変化させている。結果を図11に示す。タービン膨張比を上げるにつれてガス発生機部熱効率は低下するがタービン出力が増加するためエンジンシステム熱効率は向上することがわかった。タービン膨張比はできるだけ高くした方が良いが，バルブのオーバーラップがない場合にはさらに高くすることも可能であると思われる。

(2) タービン断熱効率の影響

当然の結果として断熱効率が高くなれば同じタービン入口条件に対してタービン出力が増加するから，他に全く影響せずにエンジンシステム熱効率のみ高くなった。

(3) 排気系圧力損失率の影響

排気系圧力損失率が増加するとタービン入口圧力が上昇し，レシプロエンジン部の熱効率が悪化する。しかしレシプロエンジン部からの排気の温度が上昇するためタービン仕事が増加し，エンジンシステム熱効率低下はガス発生機部ほどではなく僅かであった。

以上のように，通常のレシプロエンジンをガス発生機としたガスタービンシステムについて，各パラメーターの影響を調べた結果，エンジンシステム熱効率には圧縮機圧力比，タービン膨張比，レシプロエンジン部壁面温度等が大きく影響することがわかった。これらの知見をもとに熱効率の改善を試みた。表2にベースデータから変更した主要パラメーターの値およびその時の計算結果を示す。エンジンシステム熱効率37.7[%]，比出力231.6[kW／(kg／sec)]という結果が得られたが目標の熱効率50［%］を大幅に下まわった。

4.4 バイパス用圧縮機の導入

熱効率，比出力ともに期待したほど高くない原因を調べたところ，過給用圧縮機の駆動仕事が少ないためにレシプロエンジン部の行う仕事も小さくなり燃空比が薄く，燃焼行程においてシリンダー内温度が十分上昇しないためにタービン入口温度も817.35［K］と低く，出力が多く得られないためであると思われた。駆動仕事を増加させる方法としてまず，過給用圧縮機の圧力比を上げることが考えられるが4.2で述べたように高圧力比はシリンダ内最高圧力の上昇を招くので適用できない。そこで検討対象システム（タイプ①）にエンジンバイパス用圧縮機を設けることにした。それによりレシプロエンジン部の負荷を増加させれば，タービン入口温度がより上昇し熱効率が向上すると考えた。システムの構成図を図12に示す。レシプロエンジン部の排気ガスとバイパス圧縮空気が混合し，タービンに流入して仕事を行う。タービン入口温度は，時々刻々の排気ガスの状態が求められているので容積一定の容器に排気ガスおよびバイパスからの圧縮空気が流れ込み混合すると仮定してタービン入口の状態量を求めた。

次にバイパスシステムにおいてバイパス用圧縮機がエンジンシステムの熱効率および比出力に及ぼす影響を調べた。ベースエンジンとしては表2のパラメーターを用いた。

(1) バイパス用圧縮機の圧力比の影響

バイパス比（バイパス空気量／レシプロエンジン吸入

表2　入力データ及びエンジン性能結果

Output Data		
Parameter	Unit	Value
Turbine Inlet Temperature	K	817.35
Thermal Efficiency	%	37.7
Specific Power	kW/(kg/sec)	231.6
Input Data		
Parameter	Unit	Value
Pressure Ratio		5.0
Intake Valve Closing	deg	*-5.0
Exhaust Valve Opening	deg	*300.0
Intake Valve Opening	deg	*495.0
Average Wall Temperature	K	738.15
Turbine Expansion Ratio		4.54

*measured from BDC

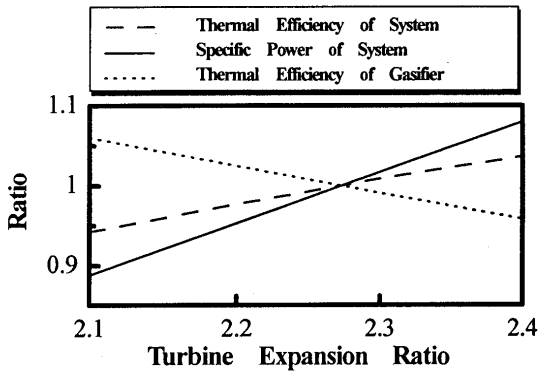


図11　タービン膨張比の影響

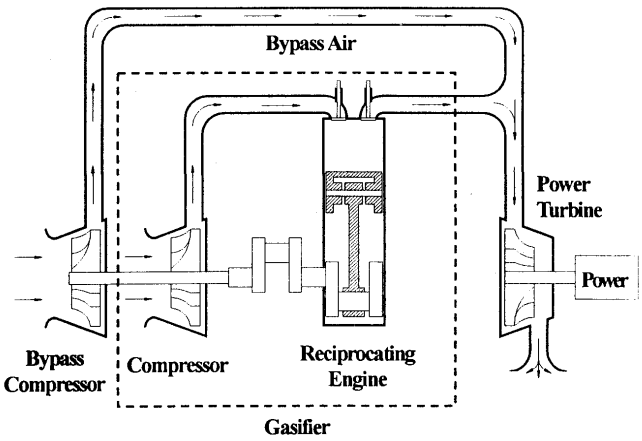


図12　エンジン構成（タイプ②）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/0821.

空気量）を1：1とし，バイパス用圧縮機の圧力比を変化させた場合の計算結果を図13に示す。高圧力比にするほどタービン膨張比も大きくなるので圧縮機駆動仕事が増加しレシプロエンジンが外部に行う仕事も増加するが，排圧が高くなるためガス発生機部熱効率は悪くなる。タービン入口の温度，タービン膨張比も高くなるためにエンジンシステム熱効率は上昇し，比出力は大幅に増加した。また熱効率は圧力比5以上ではそれほど変わらないことがわかった。

(2)　バイパス比の影響

バイパス側圧縮機の圧力比を5.0一定としバイパス比を変化させた場合の結果を図14に示す。バイパス比が増加すると燃料供給量が増加し，排気ガス温度が高温となるが，バイパス空気量が増加しているためタービン入口温度はそれほど変化していない。比出力はタービン入口温度に比例して変化するが，エンジンシステム熱効率はほとんど変化しないが1.0においては最高となった。

(3)　最適値の検討

以上の検討を参考にし，現時点で適当と思われるパラメーターを選定しそのときの性能計算結果とともに表3に示す。レシプロエンジン部の負荷を上げるためバイパス用圧縮機を導入したが，バイパス比を増加させるよりも，バイパス用圧縮機圧力比を高くするほうが熱効率向上には効果が大きいことがわかった。シミュレーションの結果，タイプ①と同様に冷却損失0とした場合，タービン入口温度1091.48［K］，エンジンシステム熱効率46.5［%］，比出力388.9［kW／(kg／sec)］という結果が得られ，タイプ①に比べると熱効率，比出力共に大幅に改善されたが目標の熱効率50［%］には到達しなかった。

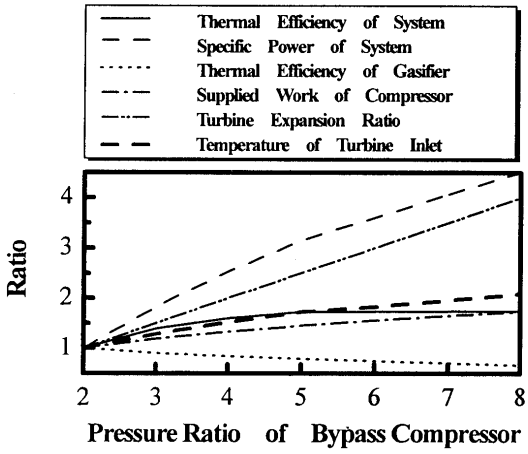


図13　バイパス圧縮機圧力比の影響

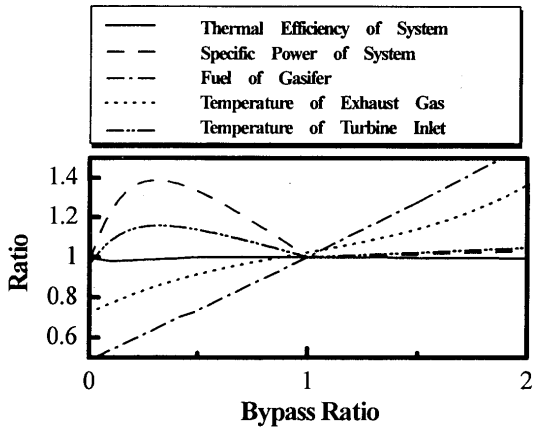


図14　バイパス比の影響

表3　入力データ及びエンジン性能結果

Output Data		
Parameter	Unit	Value
Turbine Inlet Temperature	K	1091.48
Thermal Efficiency	%	46.5
Specific Power	kW/(kg/sec)	388.9
Input Data		
Parameter	Unit	Value
Pressure Ratio (Supercharger)		3.0
Pressure Ratio (Bypass)		8.0
Compression Ratio		18.0
Bypass Ratio		1.0 : 1.0
Intake Valve Closing	deg	*-5.0
Exhaust Valve Opening	deg	*337.0
Exhaust Valve Closing	deg	*539.0
Intake Valve Opening	deg	*569.95
Average Wall Temperature	K	1393.15
Gasifier Speed	rpm	5000.0

*measured from BDC

5．まとめ

熱交換器無しでも大型ガスタービン以上の熱効率の実現を目指し，容積型ガス発生機部を有する小型ガスタービンの性能をシミュレーションプログラムを開発し検討した。その結果，「バイパス用圧縮機」の導入により熱効率46.5［%］，比出力389［kW／(kg／sec)］と大幅な改善が見られた。更なる熱効率向上にはタービン入口温度の一層の高温化が必要と思われるが，そのためには燃焼時の最高圧力が上昇し過ぎないような燃焼パターンの工夫と排気弁の開閉時期とを組み合わせた最適制御が有効と思われる。また，燃焼のさせ方は排気ガス特性にも直接影響するから，その面からの燃焼パターンの検討も重要である。これらの最適化により更に高効率化がはかられ，50［%］以上の熱効率も可能との感触が得られている。

参考文献

(1)　Hoker, J., S.A.E. Trans., 65 (1957)
(2)　Schweitzer, P.H., The Present and Future of the Internal Combustion Engine, vol. 1, (1962)
(3)　伊藤高根・齊藤秀男，東海大学紀要工学部 37－2, (1997), P. 153－160

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

技術論文

直接加熱型高温触媒燃焼器のコンセプトと燃焼特性

A Concept and Combustion Characteristics of a High-Temperature Catalytic Combustor with Starting Burner

吉田 祐作*1 YOSHIDA Yusaku
親川 兼俊*1 OYAKAWA Kenshun
相澤 幸雄*2 AIZAWA Yukio
茅 博司*3 KAYA Hiroshi

キーワード：触媒燃焼，ガスタービン，触媒，低温始動，排出ガス，
Catalytic Combustion, Gas Turbine, Catalyst, Cold Start, Emission

Abstract

When a catalytic combustor is mounted on an engine, the required combustor performance must be maintained over a wide range of operating conditions from cold starting to steady-state operation. Particularly during the initial stage of cold starting when the catalyst is not yet activated, the catalyst must be heated by some means. Various methods for enabling cold starting have been developed. These have such shortcomings as emitting more NOx during startup as the combustor becomes larger. This study proposes a new concept of a catalytic combustor with a direct heating system in order to downsize the combustor and reduce the warm-up time during cold starts. This new concept employs a vaporizing tube which mixes gas and functions as a starting burner. This paper outlines the operation concept covering cold start, verification of the concept with flame visualization in the combustor, a construction of the combustor, and combustion characteristics of the combustor.

1．まえがき

触媒燃焼方式は拡散燃焼や予混合燃焼方式に比べさらに低NOx化が可能であり，多種燃料対応の低公害燃焼方式として高いポテンシャルを有することを既報[1]で示した。この燃焼方式を自動車用セラミックガスタービンに適用するため，石油燃料を用いた触媒燃焼器の研究開発を実施し，これまで燃焼器入口空気温度が700℃における燃焼触媒構成の最適化[2]や高温触媒燃焼における燃焼温度特性とNOx排出特性[3]および触媒燃焼と追い焚き燃焼を併用する複合触媒燃焼器の開発[4]について報告した。これらは，燃焼空気が熱交換器により加熱され，すでに高温化している条件を想定した場合の結果である。しかし，触媒燃焼器をエンジンに搭載するためには，定常運転のみならず冷態始動から暖機運転までを含めた広い範囲の全運転条件で燃焼器の所要の性能を確保する必要があり，特に触媒が活性化しない冷態始動時においては，何らかの手段で触媒を加熱する必要がある。

原稿受付 1999年6月25日
＊1 (財)日本自動車研究所
〒305-0822 茨城県つくば市苅間2530
＊2 日石三菱(株)
＊3 (財)石油産業活性化センター（現 東燃(株)）

冷態時の始動方法として，これまでいくつかの方法が考えられている。触媒燃焼部の上流にプリバーナを設ける方式[5]や再生式では始動用バーナで始動し，暖機後バイパス弁で閉じる方式[6]などが挙げられる。これらは構造が複雑で燃焼器が大きくなり，ガスタービンを車両搭載する場合には適当でない。

そこで，燃焼器の小型化を図るとともに冷態始動時の暖機時間を短縮するため，混合気を形成する蒸発管の部分に始動用バーナの機能を持たせた直接加熱型触媒燃焼器のコンセプトを考案した。この方式によれば燃焼器を小型化できるのみならず，触媒が短時間で加熱されることから冷態始動時のNOx，CO，HCの排出をいずれも低く抑えることが可能となる。燃焼実験により，コンセプトの有効性と低公害性を明らかにした。

本報では，直接加熱型触媒燃焼器のコンセプト，可視化燃焼実験によるコンセプトの確認，さらに試作した触媒燃焼器による始動，過渡，定常の各作動条件における燃焼特性について述べる。

2．コンセプトの概要

触媒燃焼器の作動コンセプトを図1に示す。本コンセプトは，(1)冷態始動時，(2)始動から定常にいたる過渡時

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

および(3)定常時からなる。燃焼器出口温度は1200℃以上を設定している。触媒燃焼器は可変スワーラ，エアアシスト式噴射弁，蒸発管，点火プラグ，耐熱1000℃で低温活性の高い1段目触媒と耐熱1200℃以上の2段目，3段目触媒から構成される。1段目と2段目触媒の間のライナに流入孔を設け，旋回が強い場合にはライナ外部から高温混合部に向けて燃焼ガスが流入する構造である。そのため，始動時に高温の火炎が1段目触媒を直接加熱することはない。本コンセプトの特徴は始動時から過渡時，過渡時から定常時への作動切り換えを燃焼空気の旋回強度と燃料噴射弁の微粒化用空気流量の調節によりスムースに行うことができ，構造が小型化できることである。これらの作動を以下に示す。

(1)始動時：常温の燃焼空気が可変スワーラによって旋回を付与され蒸発管に流入する。蒸発管内で燃料噴射弁から噴射された燃料噴霧に点火プラグで点火し，旋回火炎を形成させ始動用バーナとしての機能を確保する。蒸発管内の中央部と1段目触媒を通じて大きな循環流が形成されるため，火炎が1段目触媒に直接あたることはなく，高温混合部に流入した燃焼ガスの循環によって1段目触媒は加熱される。また，高温混合部に流入した燃焼ガスは2段目，3段目触媒を通過しそれらを加熱するとともに触媒作用により燃焼ガス中のCO，HCの未燃分を完全燃焼させて排出される。

(2)過渡時：始動後は，速やかに1段目触媒が加熱され，触媒温度は活性が得られる着火温度（200℃）以上に上昇するとともに，2段目触媒の放射熱をうけてさらに加熱され1段目触媒の温度は上昇する。本コンセプトは排気熱による熱交換器の使用を想定しており，それにより燃焼器入口空気温度が上昇してきたら過渡時に移行する。始動用バーナは蒸発管の管壁近傍で保炎されることから，始動用バーナの消炎は微粒化用空気流量を増加させ噴霧を微細化し貫通力を低下させて行う。この状態から始動用バーナは消炎し，触媒燃焼のみとなる。燃焼空気温度が液体燃料の完全蒸発に必要な温度以下であっても，1段目触媒の燃焼ガスによって循環ガスが加熱され，蒸発管内で内部循環加熱が持続される。それにより，2段目触媒以降の触媒燃焼に必要な高温が保持され，触媒燃焼が持続する。

(3)定常時：燃焼空気温度が所要の温度以上に予熱されると定常の作動状態に入る。通常の触媒燃焼器はこの条件で作動する。過渡から定常への移行は燃焼空気の旋回強度を調整して行う。

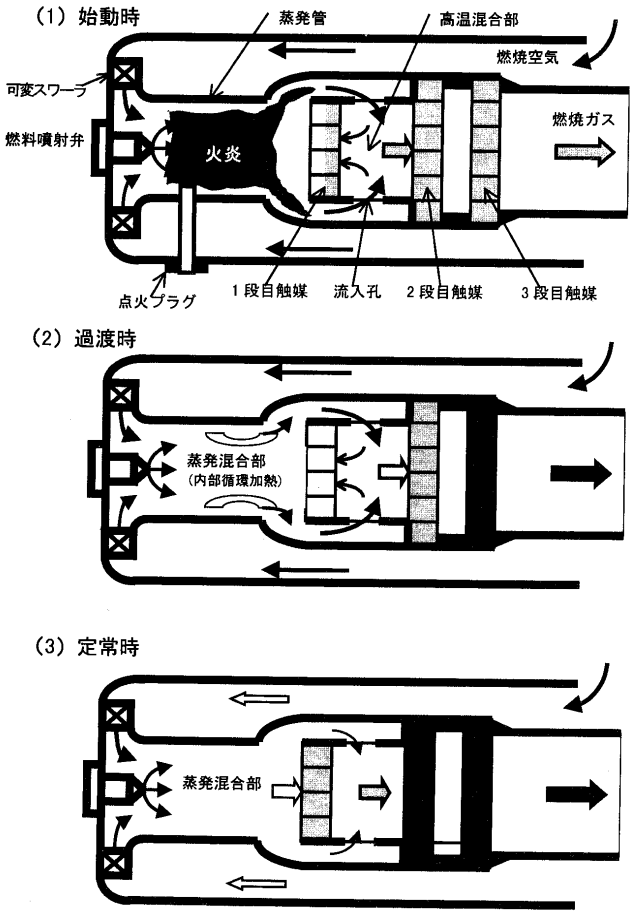


図1　作動コンセプト

3．可視化燃焼実験

始動用バーナのコンセプトを確認するため，図2に示すような蒸発管と触媒ライナ部に石英ガラスを取付けた可視化構造の燃焼器を実験に用いた。燃焼器の構造は，1段目触媒の上流にスリットを設け，始動時，燃焼中のガスの一部を触媒ライナ外周部に流入させ，燃焼ガスを触媒ライナに設けた流入孔から1段目触媒と2段目触媒の中間に位置する高温混合部に供給するものである。さらに，この構造は触媒燃焼時に多少予混合気の不均一性が存在しても，高温混合部を設けることによって燃焼ガスの均一化促進をねらいとしている。

蒸発管の寸法は，入口内径70 mm，出口内径90 mm，直管部長さ100 mm，拡大管部長さ130 mmである。流入孔は触媒ライナの1段目触媒出口端から20 mmの周方向位置に設け，直径12 mmの孔を12個等間隔で配置

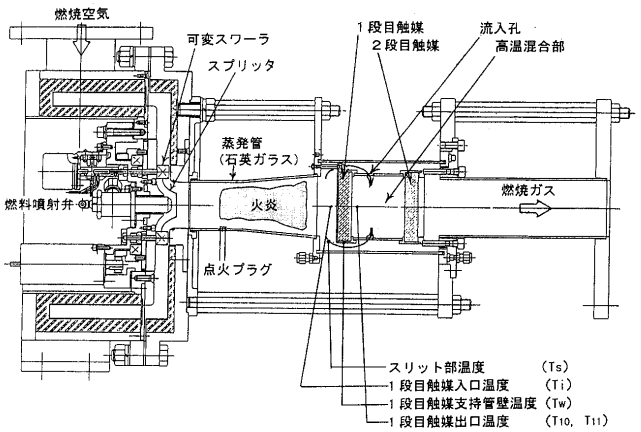


図2　可視化燃焼器の構造

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

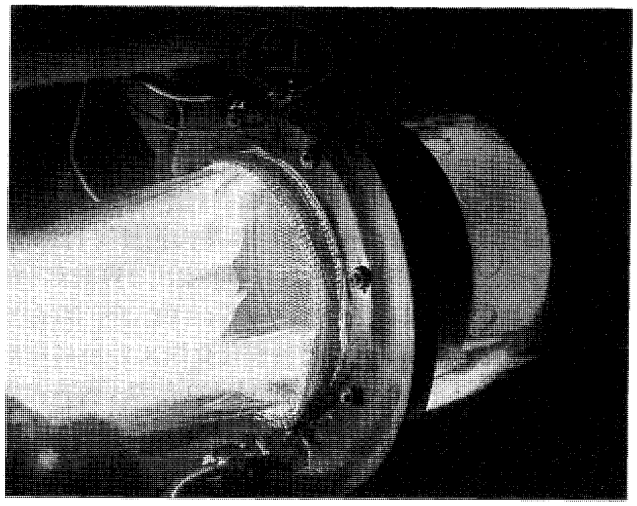


図 3　始動用バーナの燃焼状態

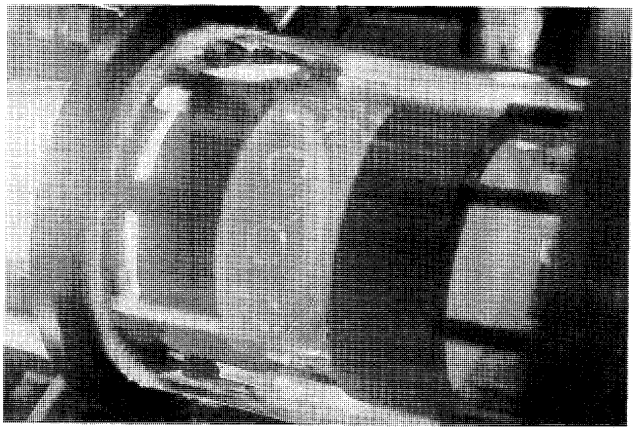


図 4　触媒の加熱状態

した。スリット幅は，蒸発管出口から1段目触媒までの距離で12 mm，1段目触媒と2段目触媒の間隔は60 mmを採用した。これらは，始動用バーナと触媒燃焼の良好な燃焼状態がえられる条件のものを選定した。

燃料噴射弁はエアアシスト式噴射弁を用い，スプリット比［(スプリッタ出口径／蒸発管入口径)^2］が0.25のスプリッタを燃焼空気の流れを調整するために用いた。

本実験では，主として1段目触媒まわりの温度特性と燃焼状態の把握を目的に，1段目触媒は従来用いている耐熱1000℃で活性の高いPd／アルミナ／コーディエライトのハニカム触媒[3]を用い，2段目触媒には耐熱1500℃のチタン酸アルミニウムのハニカム体を用いた。これらはいずれも外径100 mm，厚さ20 mm，セル数200セル／in^{2}である。温度の測定は，1段目触媒入口温度（Ti），スリット部ガス温度（Ts），1段目触媒支持管壁温度（Tw），1段目触媒出口で半径0 mm，20 mmの各温度（T 10，T 11）および2段目触媒入口の各温度（T 20，T 21）について直径1 mmのシース型R熱電対で行った。また，可変スワーラを使用し着火性や燃焼状態に影響する燃焼空気の旋回強度を任意に変えられるものとした。燃料には灯油を用いた。

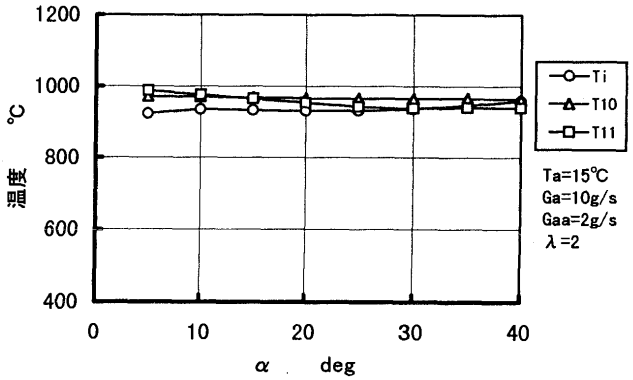


図 5　1段目触媒温度特性（Ga＝10 g／s）

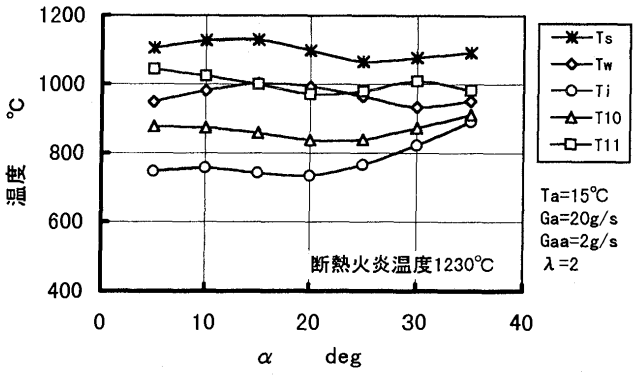


図 6　1段目触媒温度特性（Ga＝20 g／s）

着火は，蒸発管部分に設けた点火プラグで行い，スワーラ旋回角を変化させながら，着火時間と各部温度測定および火炎の挙動と触媒各部の状態などを観察した。常温空気を供給し，旋回角を変化させ着火時間を調べた結果，旋回角15°～30°で着火時間1秒以下がえられ，良好な着火性が確認された。

始動用バーナとして機能させた場合の旋回角（α）35°，燃焼空気流量（Ga）10 g／s，空気過剰率（λ）2における燃焼状態を図3，4に示す。図3は，火炎が1段目触媒に流入せずにスリット部に流入する状態を示す。図4は，燃焼ガスによって1段目と2段目の触媒が加熱された状態を示す。これらより，始動用バーナの燃焼状態が把握できた。

上記の燃焼条件で旋回角を変化させた場合の1段目触媒前後面におけるガス温度を図5に示す。火炎を形成しても触媒前後のガス温度はいずれも1000℃以下で触媒の耐熱温度以下におさえられている。また，旋回角を変えてもあまり変化していない。これはGaが10 g／sでは燃焼が蒸発管内でほぼ終了することによるものである。Gaを20 g／sに増加させた場合の1段目触媒周りの各部温度を図6に示す。αが5°～10°の場合は，流速分布の測定結果から蒸発管中央部に循環流領域が形成されないことを得ている。この場合，目視観察によると蒸発管の管壁部で保炎された環状の火炎はスリット部と1段目触媒外周部を通過して後流に伸びている。1段目触媒入口温度（半径20 mm位置）は750℃に対して，対応

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

する出口温度（半径 20 mm 位置）は 1050℃ 程度である。α を増加させるとスリット部に流れる燃焼ガス量が増加するようになり，流入孔から高温混合部に流入するガス量も増加し，流入ガスの貫通力も増大する。さらに，1 段目触媒から蒸発管を含めて循環流が形成されるようになる。その結果，α を増加させるにしたがい Ti，T 10，T 11 は 25°～30° にかけて温度の均一化が進むものと思われる。これらの燃焼状態と温度分布より，図 1 の(1)に示す始動用バーナのコンセプトの有効性が確認された。

4．触媒燃焼器の燃焼特性

4.1　触媒燃焼器の構造

実機搭載可能な燃焼器構造を検討し，図 7 に示す逆流缶型の触媒燃焼器を試作し，燃焼実験に用いた。燃焼器入口温度は常温から 700℃，燃焼器出口温度は 1200℃ 以上を使用条件として設定した。燃料噴射弁，可変スワーラ，スプリッタ，点火プラグは可視化燃焼実験で用いたものと同一である。蒸発管形状もほぼ同じであるが，直管部の長さを 150 mm とし拡大管部の長さを 40 mm とした。1 段目触媒は可視化実験と同一材料で直径 100 mm，厚さ 12 mm のものを用いた。2 段目，3 段目触媒は直径 100 mm，厚さ 20 mm で耐熱 1200℃ のヘキサアルミネート系触媒を用いた。ここで，触媒部の流路断面の直径は 90 mm である。流入孔は直径 10 mm の孔を 12 個設け，1 段目触媒と 2 段目触媒の間隔は 50 mm とした。

4.2　実験方法

図 1 の作動コンセプトに示す始動時，過渡時，および定常時を想定した作動条件での燃焼実験を行った。燃焼空気流量は 5～60 g／s，微粒化用空気流量（Gaa）は 1～3 g／s，燃焼空気温度は常温～700℃，燃焼器圧力は常圧で実験を行った。燃料には灯油を用いた。温度計測は，1 段目触媒まわりは可視化燃焼実験と同一位置で行い，さらに，2 段目と 3 段目触媒の出口後流 10 mm 位置の水平断面において半径方向距離 20 mm 間隔で各 5 点測定した。また，燃焼器出口温度は燃焼器出口 150 mm 位置で測定した。排出ガスは燃焼器出口 200 mm（位置 1）と 1.5 m（位置 2）で水冷多孔プローブを用いて採取し，自動車用排ガス分析計で分析した。

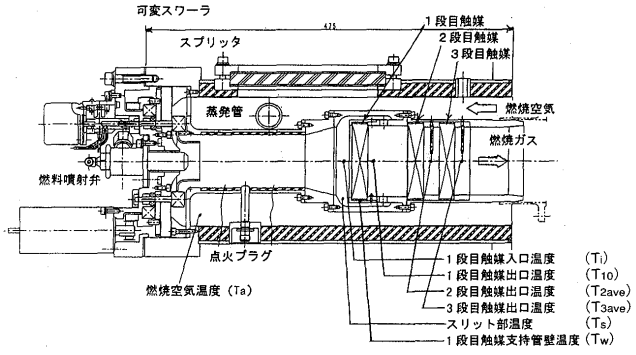


図 7　触媒燃焼器の構造

4.3　燃焼特性

図 1 に対応する各作動条件について，触媒燃焼器の温度特性と排出特性をそれぞれ調べた。

(1)　始動時

始動用バーナの着火は，常温空気を供給し Ga＝5 g／s で行う。着火後，燃焼空気流量をそれぞれ 10，20，30 g／s に保持し λ＝2 の一定条件（断熱火炎温度 1230℃）で燃焼させ，時間の経過とともに各部温度と排出ガスがどのように変化するかを調べた。Ga＝10，20，30 g／s の場合における各部温度の時間変化を図 8，9，10 に示す。図中の T 10，T 2 ave と T 3 ave はそれぞれ 1 段目触媒出口中央のガス温度，2 段目および 3 段目触媒出口の 5 点の各平均温度を示す。図 8 より，着火後 2 分以内で触媒部周りの各部温度は 800～1000℃ 程度まで急速に上昇する。この状態で図 1 の過渡時の作動に変化させることは可能である。また，燃焼空気は常温で供給されるが，

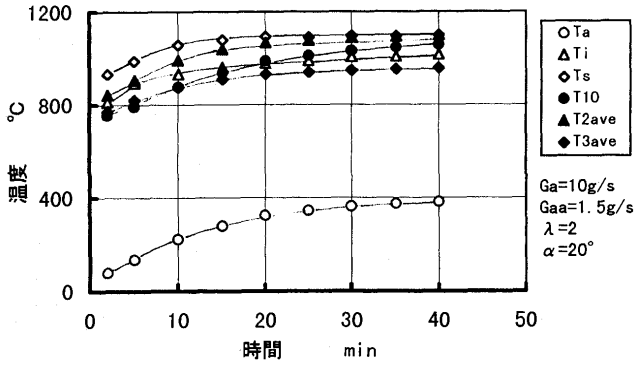


図 8　温度特性（Ga＝10 g／s）

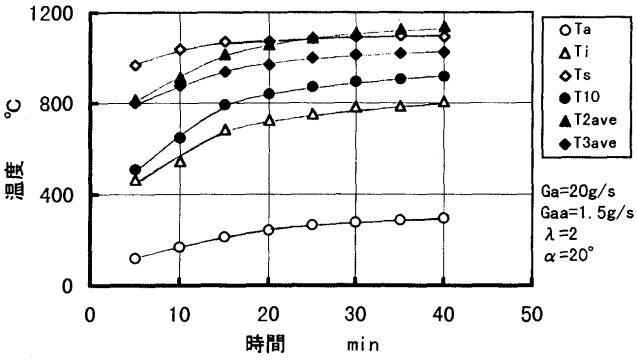


図 9　温度特性（Ga＝20 g／s）

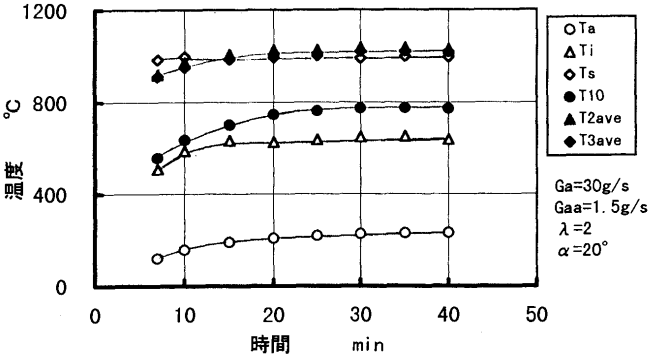


図 10　温度特性（Ga＝30 g／s）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

逆流缶型構造であるのでライナから受熱し，Taは時間の経過とともに上昇する。図9より，着火後20分まではTsが最も高いが，その後は2段目触媒出口温度が最も高い。すなわち，20分経過後は2段目触媒で完全燃焼していると思われる。40分経過後でも，1段目触媒の入口出口温度はそれぞれ810℃，920℃で触媒の耐熱温度以下に保持される。図10より，Ts，T2ave，T3aveともほぼ同じ温度経過を示す。このことは2段目触媒で反応が終了せずに3段目触媒まで燃焼が持続していると思われる。ここで，蒸発管内平均流速は，20分経過後においてTaの温度で換算するとGaが10，20，30 g／sの場合，それぞれ5.2，8.4，11.8 m／sである。

ここで，上記の温度特性と可視化燃焼実験をもとに空気流量を変化させた場合の燃焼状態をモデル化すると図11のようになる。(1)の低空気流量（Ga＝10 g／sに対応）では黄色の火炎は2段目触媒の前でほとんど燃焼し，燃焼ガスが触媒を加熱する。(2)の中空気流量（Ga＝20 g／sに対応）では流速が増加した結果，火炎が後流に伸び2段目触媒で反応が完結し，燃焼ガスが3段目触媒を加熱する。(3)の高空気流量（Ga＝30 g／sに対応）では2段目触媒で反応が進むものの完結せず，3段目触媒まで燃焼が進む。さらに空気流量が多い場合は，3段目触媒の後流で青色火炎を形成し完全燃焼する。

次に，Ga＝10，20，30 g／sの場合におけるHC，CO，NOxの排出濃度の時間経過を測定位置2について，それぞれ図12，13，14に示す。図12より，Ga＝10 g／sの場合は蒸発管で燃焼がほとんど終了する結果，HCはほとんど排出されない。Ga＝20 g／sの場合は火炎が2段目触媒まで伸びる結果，触媒が加熱されるまでHCがやや排出される。10分後は6 ppm（O_2＝16%）となり，それ以後はほとんど排出されない。Ga＝30 g／sの場合は火炎が後流まで伸長し，2段目，3段目触媒を部分加熱し，触媒温度が徐々に上昇する結果，HCは時間経過とともに減少傾向にある。しかし，排出濃度はいずれも低レベルである。

図13より，COの排出濃度も低レベルで10分経過後はほとんど排出されなかった。

図14より，NOxはGa＝10，20 g／sとも時間経過とともに増加する。これは火炎をともなう燃焼が主体であ

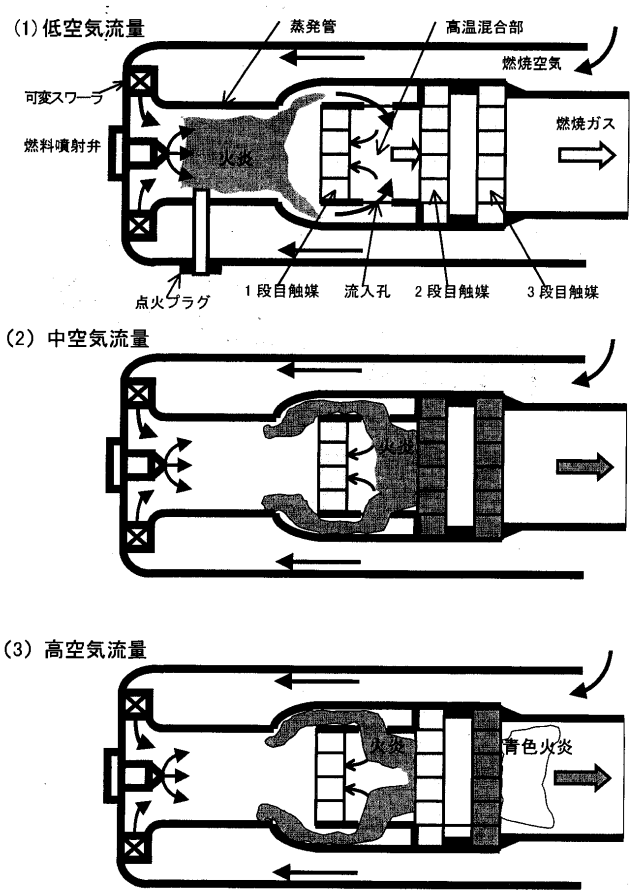


図11　始動時の燃焼状態モデル

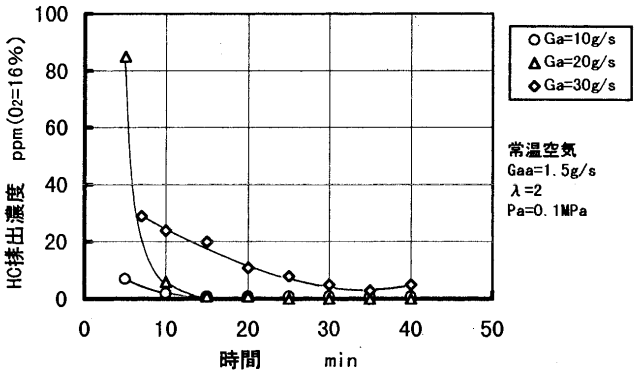


図12　始動時のHC排出濃度

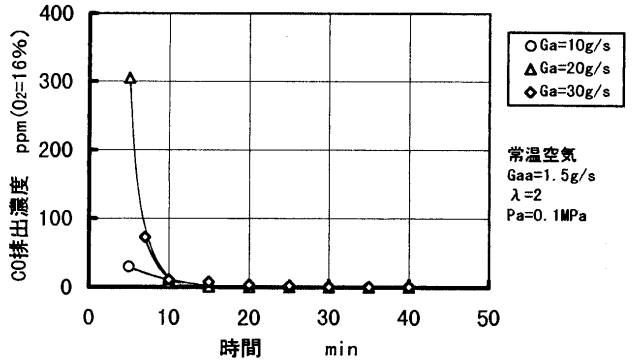


図13　始動時のCO排出濃度

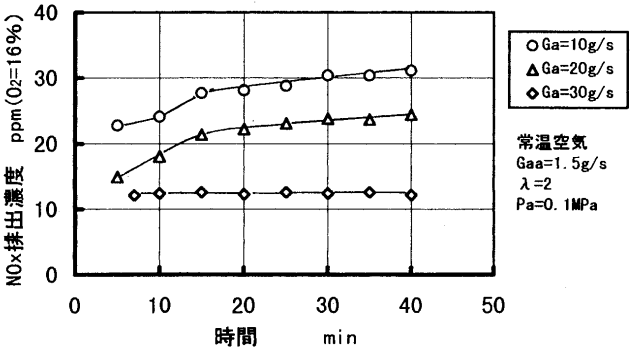


図14　始動時のNOx排出濃度

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

り，Ta の増加による燃焼温度の増加によるものであろう。一方，Ga＝30 g／s の場合は時間経過によらず NOx はほぼ一定で，低い値である。これは火炎をともなう燃焼とともに触媒燃焼の割合も高くなるためであろう。

従来の始動用バーナは拡散燃焼が主体で NOx，CO の排出レベルは高くなる。しかし，本研究の始動用バーナは拡散燃焼と触媒燃焼を併用するため，NOx，HC，CO の排出をいずれも低減でき冷態始動時においても低公害燃焼が実現できることがわかった。

(2)　過渡時

始動用バーナを消炎させ，定常時にいたる触媒燃焼のみの作動条件が過渡時である。この条件に対応する燃焼特性を調べるため，Ga＝20，30 g／s について始動用バーナを 40 分運転し各部の温度が一定となった後，触媒燃焼のみに切換えた場合の NOx の排出濃度を調べた。始動用バーナの消炎は微粒化用空気流量を 1.5 g／s から 3 g／s に変化させ噴霧を微細化し貫通力を低下させて行った。その後，始動時の条件と対応させるため 1.5 g／s に戻し過渡時の燃焼実験を行った。

過渡時における Ta は始動用バーナの条件と対応するよう 250～300℃ とした。旋回角を 20～45° 変化させた場合の結果が図 15 である。触媒燃焼のみの過渡時に移行することにより NOx 排出濃度は 1～3 ppm と極めて低い値になることがわかった。

(3)　定常時

Ta＝500℃，700℃ において，旋回角を変化させ触媒燃焼の排出特性を調べた結果を図 16 に示す。燃焼器入口温度を高温化しても NOx，CO，HC などの排出濃度を極めて低いレベルに抑制し得ることが示された。この作動条件では，触媒の耐熱性を考慮し燃焼器出口温度を 1200℃ と設定したが，触媒の耐熱性を向上させることにより，さらに出口温度の高温化が可能である。しかし，高温化に際して蒸発管内の循環流の形成は逆火要因となることから，燃焼空気の旋回角は大きくとれず α＝10～20° での均一性の高い混合気形成技術の開発が必要である。

5．まとめ

触媒燃焼器を実機搭載するために必要な冷態始動時から定常時までの作動を可能とするコンパクトな直接加熱型触媒燃焼器のコンセプトを実証するため，可視化用燃焼器と試作した触媒燃焼器を用いて燃焼実験を行い，以下の結果を得た。

(1)　触媒燃焼器の蒸発管の部分に始動用バーナの機能を持たせたコンパクトな触媒燃焼器のコンセプトの可能性が実証できた。

(2)　始動時において，始動用バーナの燃焼により NOx，CO，HC がやや排出されるが 10 分間の燃焼後にはいずれも数 ppm 以下に低下し，従来の拡散燃焼方式のプリバーナより NOx，CO，HC の一層の低減が可能である。

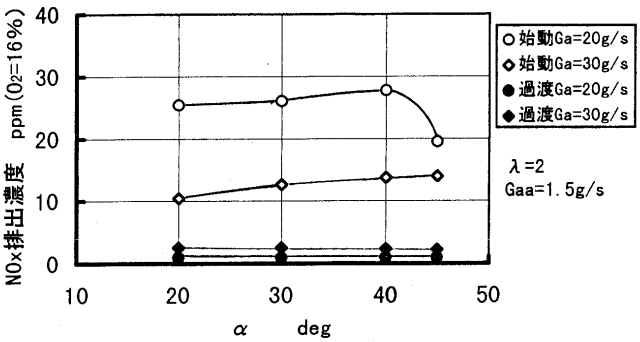


図 15　NOx 排出濃度の比較（始動時と過渡時）

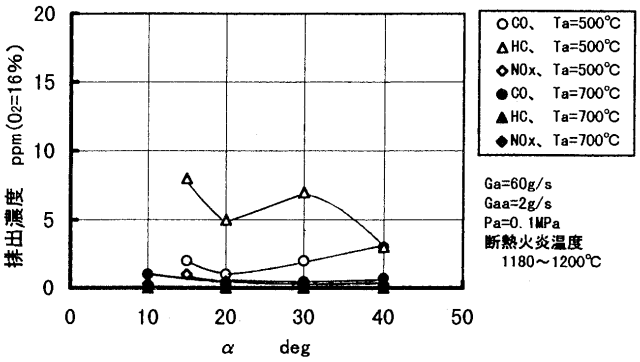


図 16　NOx 排出濃度（定常時）

また，空気流量を増加させると触媒燃焼割合が増加し，NOx を抑制できることがわかった。

(3)　始動時から触媒燃焼のみの過渡時に移行することにより，NOx は大幅に低減できることがわかった。

燃焼器出口温度のさらなる高温化と触媒燃焼器の信頼性向上のため，耐熱性の高い触媒の開発が必要であり，高温触媒の開発と触媒燃焼器の開発を併行して行っている。

本研究は通商産業省資源エネルギー庁の補助金を得て，㈶石油産業活性化センターが実施している技術開発事業の一環として行われたものである。

参考文献

(1)　HANDA, N., YOSHIDA, Y., 26 TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION, POSTER SESSION 109 (1996)

(2)　半田統敏，他；第 11 回ガスタービン秋季講演会講演論文集，(1996－10)，193－198

(3)　吉田祐作，他：第 11 回ガスタービン秋季講演会講演論文集，(1996－10)，199－204

(4)　木村武清，他；第 11 回ガスタービン秋季講演会講演論文集，(1996－10)，187－192

(5)　KITAJIMA, J., KAJITA, S., ASME Paper 89－GT－265 (1989)

(6)　LUNDBERG, R., GABRIELSSON, R., ASME Paper 95－GT－446 (1995)

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

東京理科大学工学部熱流体工学研究室における研究

本阿弥眞治*1
HONAMI Shinji

キーワード：熱流体工学，ガスタービン要素技術，実験流体力学，実験・計測技術の継承

1．研究室の概要

東京理科大学工学部機械工学科の熱流体工学研究室は，1974年度に開設され，既に25年の歳月が過ぎようとしている。現在の構成（1999年度）は，筆者の他，志澤高朗講師，大学院博士課程2名，修士課程13名，学部4年生13名である。尚，工学部機械工学科には，流体工学研究室として，酒井俊道教授と山本誠助教授の2研究室がある。

本研究室では，熱講座を担当しているので，ガスタービン翼の膜冷却性能の向上やダンプディフューザ型燃焼器の空気力学特性の改善，そして，超音速インテークの内部流れの研究といったガスタービンエンジンの要素研究に取り組み，併せて，馬蹄形渦や壁面パルスジェット，そして，乱流剥離と再付着過程のような流体工学上の問題にも取り組んでいる。

上記の課題に対して，実験流体力学EFD(Experimental Fluid Dynamics）の立場から，まず，独自に開発した計測システムや長年にわたって蓄積された実験技術を背景に現象の把握に努めている。それに基づき，実際の流体機器の設計に必要な基礎データを提供し，CFD（Computational Fluid Dynamics）を補完する一貫したアプローチにより，社会の必要に対応すべく研究の方向を規定している。

2．研究テーマ

現在，研究室で取り組んでいる主な研究課題を以下に列挙する。

2.1　ガスタービン要素研究

空，陸用ガスタービンは空気力学的にも伝熱工学的にも厳しい条件が課せられている。そこで，ガスタービン翼の膜冷却については，温度と速度の同時測定や温度感応型液晶により冷却空気の挙動を明らかにし，先進冷却技術の開発に取り組むようにしている。この他，ダンプディフューザ型燃焼器の空気力学特性を改善するため，図1に示すように再循環渦の挙動に着目し，全圧力損失ならびに分岐流路への流量配分特性が優れた流路形状の開発に取り組んでいる。

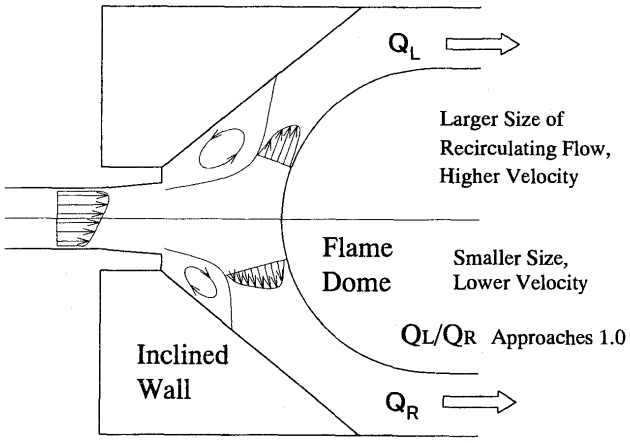


図1　傾斜板を装着したダンプディフューザ燃焼器における優れた流量配分特性に関する流動機構
（Q_L と Q_R は左右分流路の流量）

2.2　超音速インテークならびに衝撃波と境界層の干渉に関する研究

東京と米国西海岸を現在の半分の時間で飛行できる航空機の実現が計画され，日欧米では超音速技術の開発が進められている中で，新たにエアターボラムジェットエンジンを開発する必要が出てきた。そこで，航空宇宙技術研究所を中心としたインテーク研究会に1988年の発足時より参画し，各要素研究の中で，ターボラムジェットのインテーク（空気取入れ口）の研究に取り組んでいる。飛行マッハ数が高くなると，圧縮機ではなく，インテークを用い，衝撃波を利用して空気を圧縮することができる。しかし，インテーク内に発生する衝撃波と乱流境界層の干渉の問題を解決する必要があるので，今後，干渉場の剥離渦構造の解明と共に，抽気や渦発生器などの干渉抑制デバイスの開発を目指している。

2.3　乱流剥離の研究

流体機械の一層の効率向上を計るには，流れが剥離しても，最小限に食い止める技術の開発が必要である。それには，剥離現象を支配するパラメータを明確にし，剥離を抑制し，制御することが有効であると思われる。具体的には，後方ステップ流れを対象として，剥離の発達過程に影響を及ぼす乱れの強さや長さスケールを変化さ

原稿受付　1999年9月7日
＊1　東京理科大学 工学部
〒162-8601 新宿区神楽坂1-3

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

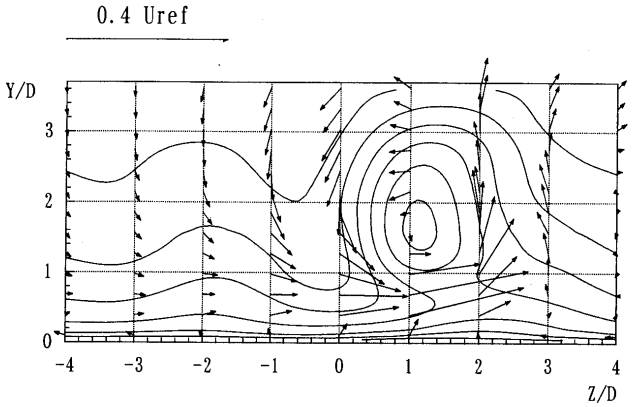
せる受動的な制御，そしてマイクロジェットによる能動的な制御の実現を目指している。この他，傾斜円柱から発生するカルマン渦ならびに傾斜円柱基部に形成される馬蹄形渦の流動機構，そして，噴流が円筒面や球面に衝突する際の壁噴流の安定性，あるいは，拘束噴流を制御するデバイスの研究を進めている。

2.4　縦渦の研究

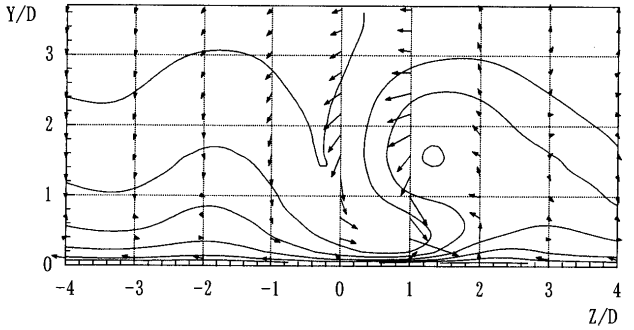
馬蹄形渦や渦発生器により生じた流れは，主流と同じ方向の軸を持つ縦渦を伴うので，乱流境界層に埋没した各種縦渦に着目し，例えば，渦発生器で生じた縦渦をタービン翼基部にできる馬蹄形渦に干渉させ，馬蹄形渦の制御の可能性を調べている。さらに，乱流混合促進の立場から，壁面パルスジェット（渦発生パルスジェット）に注目し，図2に示すように周期性を持つ縦渦構造を明らかにし，工学的応用に取り組んでいる。

2.5　マイクロセンシング技術の確立

近年の半導体製造技術が高度化する中で，マイクロデバイスの発展は著しく，例えば，自動車のエアバッグのように加速度センサとアクチュエータを組み合わせたMEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）と呼ばれる技術が製品化されている。そこで，マイクロフローセンサと呼ばれる流れの方向を検知可能な壁面センサを用いて，センサの基本特性の改善や壁面せん断応力への計測に応用するシステムを検討し，実際に，渦発生パルスジェットの計測に適用している。さらに，今後予想される各種センサのマイクロ化に対応するため，微細なセンサやアクチュエータの検定ならびに作動確認が可能な顕微鏡とマイクロマニピュレータ付きのマイクロセンシング風洞の設計と製作を精力的に進めている。この風洞を用いると，センサやアクチュエータ周りの流れの可視化や定量的な計測が可能となり，流動機構の解明を通してMEMSの開発や性能向上に役立つものと考えている。



(a) 縦渦の安定期，位相角=180度



(b) 縦渦の消滅期，位相角=266.4度

図2　吹出し孔下流のパルス渦発生ジェット内における縦渦の安定，消滅位相の等速度線と2次流れベクトル線図
（等速度線の外縁はU/Uref=1.0に対応，壁面に向い0.1刻み）

3．実験・計測技術の継承システム

前述した研究課題を実験的に解明するには，現象に即した計測技術を開発し，それらに習熟するシステムが必要である。大学の研究室では，学生は学部の1年間，もしくは学部と修士課程を合わせた3年間在籍する。研究計画を進める上で，研究課題への取り組みと同時に，計測技術と実験技術を如何に継承するかが重要なので，各大学では色々な工夫がなされている。ここでは，本研究室で実施されている計測，実験技術に関する教育と実習プログラムを紹介する。

3.1　教育プログラム

学部4年生が研究室に配属される3月末に各学生の卒業研究課題が決定され，卒業研究が開始されると同時に，当初の2ヶ月間，教育と実習プログラムを受けることになる。教育プログラムは，実験流体力学や各種計測法の理解と実験計画法の立案能力の育成を目的として，筆者の他，志沢講師，大学院博士課程の学生が担当し，実習プログラムは修士課程学生1年生（全員）が担当している。教育プログラムでは，4年生は，毎週一回，2時間から3時間，以下の題目に関する講義を聴く。

講義題目

(1)　実験流体力学概論
(2)　流体計測法概論
(3)　ピトー管計測
(4)　圧力計測
(5)　画像処理流速計による計測
(6)　熱線流速計による計測
(7)　流れの可視化法
(8)　レーザドップラー流速計による計測
(9)　数値流体力学入門
(10)　実験流体力学のまとめ／実習内容の発表

講義の間に幾つかの課題が出される。例えば，ディフューザの入口と出口部でピトー管をトラバースして計測されたマノメータの差圧のデータ一覧を表計算ソフトのエクセルで各人に与え，それを基にして，入口，出口部の境界層パラメータ（排除厚さ，運動量厚さ，形状係数），さらに，入口と出口の面積平均，ならびに質量流量平均全圧力を算出し，ディフューザの全圧力損失係数を求める課題である。これにより各学生が自分で数値積分法のプログラムを作成したり，速度や密度の算出や表

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/24

計算など，各種の計算処理を通して，計算機やソフトの使用に慣れ，データ処理技術の初歩を習得することになる。

3.2 実習プログラム

実習プログラムでは，検定風洞出口の自由噴流を対象として，教育プログラムと並行して，計測技術の実習が進められる。

まず，流れ場の計測に関しては，グループ別に割り当てられた下記の計測機器を用いて，各グループが同じ流れ場を異なる計測機器で測定する。

(1) ピトー管による計測（圧力変換器の検定を含む）
(2) 熱線流速計による計測(自作プローブの検定を含む)
(3) 噴流の可視化と画像処理流速計による計測

1班3名が組となって，班毎に熱線プローブの製作，センサの準備，トラバース装置の選択，熱線の流速検定や角度検定，可視化法のトレーサの検討，そして，圧力変換器の検定など，計測計画を立案し，実行に移す。その際，修士課程の1年生が，風洞の起動から計測器の使用法を指導する。そして，4年生からの疑問や質問に対応する。修士課程の学生は，1年前に実習したことを改めて，指導する立場で問題に取り組むことにより，両者の教育上の効果は高いと思われる。

次に，自分達で測定した速度データを処理して，作図ソフトにて処理結果を作図し，最終的にはマイクロソフトの Power Pointer に纏める。

最後に，実習内容をグループ毎に発表する。その際，液晶プロジェクタと Power Pointer を用いて，プレゼンテーションの基本を実習し，さらに，計測結果に対する質疑を受ける。

以上の教育，実習プログラムは，2年前から実施された。その背景として，計測や実験技術が複雑化し，必ずしも円滑に技術の継承が行われていないことが挙げられる。これは，学年を越えた学生間の交流が成立し難い時代の風潮の反映かとも考えている。さらに，体系的に実験・計測技術の基礎を教育するシステムの必要性を以前から考えていたことも理由の一つである。現在，試行錯誤を繰り返しながらより良いシステムを目指しているところである。

4. おわりに

研究のハードよりソフトの紹介に重点を置いて説明したのは，実験技術と計測技術に関するソフトを如何に蓄積し，継承していくかが，大きな悩みとなっているからである。各研究開発機関では同様な悩みを抱えていると思うので，ご助言を戴ければ幸いである。尚，ハードの紹介は本研究室のホームページを御覧下さい。

http：//www.me.kagu.sut.ac.jp/~honami/index-j.html

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

J3エンジン

村島　完治[*1]
MURASHIMA Kanji

エンジン形式は8段軸流圧縮機，アニュラー型燃焼器，1段軸流タービンを持つターボジェット。圧縮機は，入り口部で外径を少しテーパさせて後は外径一定の全固定翼配置で，ディスク構造のローター，静翼は内側にシュラウド付の円周6分割セクタ構造。燃焼器は当時数少ない蒸発型を採用していた。スタータは主軸直結のスタータ・ジェネレータ方式，燃料コントロールシステムはハイドロメカニカル方式である。

主な材料は，圧縮機翼に13クロムステンレス鋼，ディスク・シャフトはニッケルクロムモリブデン鋼，ケース・フレームはアルミ鋳物，燃焼器部はハステロイ，タービン翼はU500などが使われていたと記憶しており，今日のような超合金やチタン合金まだ実用になっていなかった。開発試験の段階では燃焼器ライナーやタービンノズル翼に25-20耐熱ステンレス鋼も使われた。

形式に，量産初期形式のJ3-3と，後で推力を増強したJ3-7とがある。J3-3は当初T-1B中等練習機に搭載されたが，後に推力を増したJ3-7に変更された。J3-7は対潜哨戒機のブースターエンジンとしても採用された。

太平洋戦争後禁止されていたわが国の航空機産業は昭和28年に再開され，ジェットエンジンの研究開発も始まった。数社から通商産業省に研究補助金の申請が出され，通商産業省は共同研究会社を設立させてそこに補助金を出す方針を立てて，日本ジェットエンジン株式会社が設立された。当時の出資会社は石川島重工業（現在の石川島播磨重工業），富士重工業，富士精密工業（現在の日産自動車），新三菱重工業（現在の三菱重工業）の4社で，後に川崎航空機（現在の川崎重工業）が参加した。

ここで試設計されたエンジンはJ1およびJ2と命名されたが，そのころ防衛庁では新たに中等練習機をジェットエンジン搭載で機体エンジンともに国内開発を意図したので，これの応ずるため新設計のJ3と名づけたエンジンの開発をはじめた。

当時は，エンジンの各要素をそれぞれ単独で開発試験を行う要素試験設備が無く，わずかな翼列試験データをもとに設計試作され，いきなりエンジンの形で運転試験が進められた。当時は壁面境界層への配慮や旋回失速への対策などのデータが極めて少なく，また高空作動における高い修正回転数領域での作動の解析が不十分で，圧縮機の不安定作動やこれに伴う疲労強度上の問題に悩まされた。

昭和33～34年にかけて，圧縮機の高回転域の作動安定性を改善する再設計を行い，これを生産先行型として飛行前確認試験（PFRT）を行い，35年5月にT-1Bに搭載して念願の初飛行にこぎつけた。この生産先行型の設計に際して，高回転性能の安定化のための空力設計改善が主目的ではあったが，同時に量産化を前提に当時始まっていたJ47ジェットエンジンのライセンス生産などから得られた量産型の生産技術を取り入れた構造設計を取り込むこととなった。

しかしこの開発が当初計画よりも遅れたため，T-1練習機の生産は英国製のオルフュースエンジンを搭載（T-1A）して開始されて，J3エンジンの完成後の搭載機であるT-1Bと2種類エンジン搭載機となった。

また官の意向を受けて，生産先行型の設計完了後の試作試験以降の開発・生産の責任が日本ジェットエンジンから石川島重工業に移され，他社が協力する体制が作られた。

当時，圧縮機の翼型は開発途中にNASA 65系の翼列試験データを整理・体系化したNASAレポートを入手したことから，NASA 65シリーズを採用したが，この翼型は中心翼弦線が前後縁付近で小さな曲率半径を持つために内側で翼型の切削加工が難しく，生産技術部門から改善を迫られたいたので，後の推力増強型では中心翼弦線を円弧に変更してこれに65系の基本翼厚分布を載せる形状を採用し，別途検討した流れ角修正係数を加味して設計に適用して加工性を向上した。

圧縮機の流れ計算は，流路を半径方向に10等分して半径平衡の式を数値微分・数値積分で解き，この計算はタイガー計算機，電動計算機と算盤で行い，計算尺で検算をするやり方であったが，後の推力増強型の設計では，富士通のリレー式計算機が部分的に利用できるようになった。

開発段階の図面を見ると，図面名称や記入法などに大戦時代のレシプロエンジン設計の名残が見られ，例えば「アクセサリ・ギアボックス」は「補機筐」と名づけられていたが，量産時には英語的な名前に変更されていた。

このエンジンは，エンジン本体のみならず燃料コントロールシステムまで全て自主設計開発として開発試験を

原稿受付　1999年9月13日
＊1　元石川島播磨重工業㈱
〒359-1104 埼玉県所沢市榎町4-1

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

進めてきたが，量産化に当たって作動の安定性・信頼性の見地から米国ハミルトン社製のコントロールシステムに変更された。

遅れはあったものの，ともかく制式化されて量産に入ることとなったが，機体が直径も推力も大きいオルフュースを搭載する設計となったため，1,200 kg 推力のJ3エンジンでは飛行前から推力不足が懸念されて，初飛行に備えた諸試験に並行して 1,400 kg への推力増強型の設計が石川島で開始された。

この推力増強の改良設計は，機体艤装上への影響を避けるため，エンジンの空気通路形状を変えずに圧縮機の圧力比を 4.0 から 4.2（後に 4.5）に上げて空気流量を 22 kg/s から 24 kg/s（後に 25.4）に増して推力を上げる方式を採用し，圧縮機の前2段とタービンの翼設計を新しくした。

また，この頃になると，航空技術研究所のエンジン要素試験設備が利用できるようになり，推力増強型の圧縮機やタービンの単独要素試験が実施されて正確なデータが採れ，開発試験が円滑に進むようになった。

このとき，当時，通産省の研究補助金で研究を進めていた XJ 11 超軽量エンジンの研究成果を取り入れて，圧縮機ローターの軽量化構造も取り込むことも意図したが，量産が始まったばかりのJ3-3からの変更箇所が増すことを避けるため，この軽量化構造の採用は見送りとなった。

この推力増強型はまず，対潜哨戒機 P-2J のブースターエンジンとしてJ3-7の名称で制式化された。その後，T-1B に搭載されているJ3-3エンジンも逐次推力増強型に変更された。

エンジン要目と性能

	J3-3	J3-7
形式	軸流1軸ターボジェット	同左
圧縮機	軸流8段	同左
燃焼器	蒸発式アニュラー型	同左
タービン	軸流1段	同左
全長	1,850 mm	1,994
全巾	720 mm	
重量	(370 kg)	430 kg
回転数	12,700 rpm	
推力	1,200 kgf	1,400
燃料消費率	1.08 kg/kgf/Hr	1.05
空気流量	22 kg/s	25.4
圧力比	4.0	4.5
搭載機種	T-1B	T-1B，P-2J

このJ3-7エンジンは T-1B，P-2J に搭載されて既にほとんどの運用が終わっているが，特に際立った特徴を持つエンジンとはいえないものの，その全運用期間を通じてエンジンに起因する重大事故がなく，安定した運用がなされたと評価されている。

わが国で最初に飛行した大戦中のジェットエンジンであるネ-20 などの経験を引き継いで，わが国で始めて実用化に成功したジェットエンジンとして，この経験はその後の航空エンジンの研究開発の源流をなすものと思っている。

▶ 入 会 者 名 簿 ◀

〔正会員〕

徳永節夫（三菱重工）
加藤千幸（東京大）
御法川　学（法政大）
吉田俊男（日石三菱）
木村俊明（ダイハツ）
豊田三鈴（ダイハツ）
光岡健夫（IHI）
小林健児（IHI）
藤村哲司（IHI）
篠崎正治（IHI）
柳田美由紀（住友金属テクノロジー）
当房昌幸（東芝）
一色美博（摂南大学）
井上　剛（ヤンマー）

〔賛助会員〕

ターボ システムズ ユナイテッド㈱

○ 本会協賛・共催行事 ○

会合名	開催日・会場	詳細問合せ先
第7回超音波による非破壊評価シンポジウム	H 12／1／27-28 飯田橋レインボービル 7階大会議室	日本非破壊検査協会　学術局学術課 TEL 03-5821-5105　FAX 03-3863-6524 E-MAIL : gakujutsu@jsndi.or.jp
白金族金属・合金の現状と将来	H 12／1／28 日本私立学校振興・共済事業団5階講堂	日本金属学会 TEL 022-223-3685　FAX 022-223-6312

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/0321.

進めてきたが，量産化に当たって作動の安定性・信頼性の見地から米国ハミルトン社製のコントロールシステムに変更された。

遅れはあったものの，ともかく制式化されて量産に入ることとなったが，機体が直径も推力も大きいオルフュースを搭載する設計となったため，1,200 kg 推力のJ3エンジンでは飛行前から推力不足が懸念されて，初飛行に備えた諸試験に並行して 1,400 kg への推力増強型の設計が石川島で開始された。

この推力増強の改良設計は，機体艤装上への影響を避けるため，エンジンの空気通路形状を変えずに圧縮機の圧力比を 4.0 から 4.2（後に 4.5）に上げて空気流量を 22 kg/s から 24 kg/s（後に 25.4）に増して推力を上げる方式を採用し，圧縮機の前2段とタービンの翼設計を新しくした。

また，この頃になると，航空技術研究所のエンジン要素試験設備が利用できるようになり，推力増強型の圧縮機やタービンの単独要素試験が実施されて正確なデータが採れ，開発試験が円滑に進むようになった。

このとき，当時，通産省の研究補助金で研究を進めていた XJ 11 超軽量エンジンの研究成果を取り入れて，圧縮機ローターの軽量化構造も取り込むことも意図したが，量産が始まったばかりのJ3-3からの変更箇所が増すことを避けるため，この軽量化構造の採用は見送りとなった。

この推力増強型はまず，対潜哨戒機 P-2J のブースターエンジンとしてJ3-7の名称で制式化された。その後，T-1B に搭載されているJ3-3エンジンも逐次推力増強型に変更された。

エンジン要目と性能

	J3-3	J3-7
形式	軸流1軸ターボジェット	同左
圧縮機	軸流8段	同左
燃焼器	蒸発式アニュラー型	同左
タービン	軸流1段	同左
全長	1,850 mm	1,994
全巾	720 mm	
重量	(370 kg)	430 kg
回転数	12,700 rpm	
推力	1,200 kgf	1,400
燃料消費率	1.08 kg/kgf/Hr	1.05
空気流量	22 kg/s	25.4
圧力比	4.0	4.5
搭載機種	T-1B	T-1B，P-2J

このJ3-7エンジンは T-1B，P-2J に搭載されて既にほとんどの運用が終わっているが，特に際立った特徴を持つエンジンとはいえないものの，その全運用期間を通じてエンジンに起因する重大事故がなく，安定した運用がなされたと評価されている。

わが国で最初に飛行した大戦中のジェットエンジンであるネ-20 などの経験を引き継いで，わが国で始めて実用化に成功したジェットエンジンとして，この経験はその後の航空エンジンの研究開発の源流をなすものと思っている。

▶ 入 会 者 名 簿 ◀

〔正会員〕

徳永節夫（三菱重工）
加藤千幸（東京大）
御法川　学（法政大）
吉田俊男（日石三菱）
木村俊明（ダイハツ）
豊田三鈴（ダイハツ）
光岡健夫（IHI）
小林健児（IHI）
藤村哲司（IHI）
篠崎正治（IHI）
柳田美由紀（住友金属テクノロジー）
当房昌幸（東芝）
一色美博（摂南大学）
井上　剛（ヤンマー）

〔賛助会員〕

ターボ システムズ ユナイテッド㈱

○ 本会協賛・共催行事 ○

会合名	開催日・会場	詳細問合せ先
第7回超音波による非破壊評価シンポジウム	H 12／1／27-28 飯田橋レインボービル 7階大会議室	日本非破壊検査協会　学術局学術課 TEL 03-5821-5105　FAX 03-3863-6524 E-MAIL : gakujutsu@jsndi.or.jp
白金族金属・合金の現状と将来	H 12／1／28 日本私立学校振興・共済事業団5階講堂	日本金属学会 TEL 022-223-3685　FAX 022-223-6312

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/0321.

進めてきたが，量産化に当たって作動の安定性・信頼性の見地から米国ハミルトン社製のコントロールシステムに変更された。

遅れはあったものの，ともかく制式化されて量産に入ることとなったが，機体が直径も推力も大きいオルフュースを搭載する設計となったため，1,200 kg 推力のJ3エンジンでは飛行前から推力不足が懸念されて，初飛行に備えた諸試験に並行して 1,400 kg への推力増強型の設計が石川島で開始された。

この推力増強の改良設計は，機体艤装上への影響を避けるため，エンジンの空気通路形状を変えずに圧縮機の圧力比を 4.0 から 4.2（後に 4.5）に上げて空気流量を 22 kg/s から 24 kg/s（後に 25.4）に増して推力を上げる方式を採用し，圧縮機の前2段とタービンの翼設計を新しくした。

また，この頃になると，航空技術研究所のエンジン要素試験設備が利用できるようになり，推力増強型の圧縮機やタービンの単独要素試験が実施されて正確なデータが採れ，開発試験が円滑に進むようになった。

このとき，当時，通産省の研究補助金で研究を進めていた XJ 11 超軽量エンジンの研究成果を取り入れて，圧縮機ローターの軽量化構造も取り込むことも意図したが，量産が始まったばかりのJ3-3からの変更箇所が増すことを避けるため，この軽量化構造の採用は見送りとなった。

この推力増強型はまず，対潜哨戒機 P-2J のブースターエンジンとしてJ3-7の名称で制式化された。その後，T-1B に搭載されているJ3-3エンジンも逐次推力増強型に変更された。

エンジン要目と性能

	J3-3	J3-7
形式	軸流1軸ターボジェット	同左
圧縮機	軸流8段	同左
燃焼器	蒸発式アニュラー型	同左
タービン	軸流1段	同左
全長	1,850 mm	1,994
全巾	720 mm	
重量	(370 kg)	430 kg
回転数	12,700 rpm	
推力	1,200 kgf	1,400
燃料消費率	1.08 kg/kgf/Hr	1.05
空気流量	22 kg/s	25.4
圧力比	4.0	4.5
搭載機種	T-1B	T-1B，P-2J

このJ3-7エンジンは T-1B，P-2J に搭載されて既にほとんどの運用が終わっているが，特に際立った特徴を持つエンジンとはいえないものの，その全運用期間を通じてエンジンに起因する重大事故がなく，安定した運用がなされたと評価されている。

わが国で最初に飛行した大戦中のジェットエンジンであるネ-20 などの経験を引き継いで，わが国で始めて実用化に成功したジェットエンジンとして，この経験はその後の航空エンジンの研究開発の源流をなすものと思っている。

▶ 入 会 者 名 簿 ◀

〔正会員〕

徳永節夫（三菱重工）
加藤千幸（東京大）
御法川　学（法政大）
吉田俊男（日石三菱）
木村俊明（ダイハツ）
豊田三鈴（ダイハツ）
光岡健夫（IHI）
小林健児（IHI）
藤村哲司（IHI）
篠崎正治（IHI）
柳田美由紀（住友金属テクノロジー）
当房昌幸（東芝）
一色美博（摂南大学）
井上　剛（ヤンマー）

〔賛助会員〕

ターボ システムズ ユナイテッド㈱

○ 本会協賛・共催行事 ○

会合名	開催日・会場	詳細問合せ先
第7回超音波による非破壊評価シンポジウム	H 12／1／27-28 飯田橋レインボービル 7階大会議室	日本非破壊検査協会　学術局学術課 TEL 03-5821-5105　FAX 03-3863-6524 E-MAIL : gakujutsu@jsndi.or.jp
白金族金属・合金の現状と将来	H 12／1／28 日本私立学校振興・共済事業団5階講堂	日本金属学会 TEL 022-223-3685　FAX 022-223-6312

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/0321.

報告

第14回秋季講演会・見学会の報告

湯浅　三郎
YUASA Saburo

今年は4年に一度の国際ガスタービン会議（IGTC '99 Kobe）が11月に開催される関係で，第14回秋季講演会の時期が早まり，8月26日㈭に福島県郡山市の巨大な次世代型コンベンション施設のビッグパレットふくしまに於いて開催され，翌日には三菱電機㈱郡山製作所とアサヒビール㈱福島工場の見学会が行われた。参加者は学生4名を含め91名で，例年に比べて2割弱少なかった。この減少の原因は断定はできないものの，不況や，東京に近く場所的に秋季の魅力に欠けること，国際会議との重なりなどが考えられる。これは，講演会活性化のために今後検討を要する重要な課題である。

講演会は，一般講演として翼列特性が4件，空力が5件，伝熱が3件，燃焼器が4件，材料が5件，ガスタービンシステムが3件，またオーガナイズドセッションとして「ガスタービンに関する計測及び診断」が3件の合計27件の発表が2会場であった。発表件数は例年よりかなり少なかったが，セッションの偏りはなく，どちらの会場も活発な討論が行われていた。特にオーガナイズドセッションのジェットエンジンの整備とモニタリングの講演は，どのような考え方で何を点検・モニタリングをしているのかについての解説で，飛行中はエンジン各部の状況を離発着空港で常時オンラインモニタリングしていることなどを知り，日頃航空機を利用し命を預けている我々利用者にとっては興味深い内容であった。

特別講演では，郡山文化協会副会長の伊藤朝次先生に「郡山!!歴史・文化・味　その他」と題して，郡山市の地理的特徴から始まって郡山の古代～現代までの歴史・文化を詳しくお話しいただいた。郡山市は人口33万人で福島県内で最も若者が多い市で，古代は阿尺，中世は安積（ともに，あさかと読む）と呼ばれる地だったそうである。郡山地方に熱海や上伊豆などの地名が残っているのは鎌倉時代に伊豆の武将・伊東氏の所領になったためであることや芭蕉の足跡等の解説をしていただき，秋季講演会ならではの知識が得られた。最後には，市街地中心付近の味自慢の幾つかの店を地図付き紹介された。これを参考にした参加者もいたのではと思われる。特別講演終了後，国際会議実行委員会総務委員会委員長の伊藤先生より国際会議の準備状況の報告があった。

講演会終了後，ビッグパレット内のレストランに移動して懇親会が開かれた。菅会長の挨拶の後，郡山コンベンションビューローから差し入れられた樽酒を新旧五人の会長で鏡割りをし，水町先生の音頭による乾杯で参加者一同は歓談に入った。酒たけなわな頃に郡山コンベンションビューローの柳沼，永久保両氏より郡山の良さを紹介する挨拶があり，また来年の秋季講演会は北九州市の小倉で開催されるとの報告がされた頃には，酒はあるものの最近の秋季講演会には珍しく料理が底を尽き，中締めを機に三々五々と人が減っていった。参加者数と料理の量との程合いが難しい。

翌27日㈮は残念ながら生憎の小雨模様であった。見学会参加者はバスで，最初に，郡山駅から南西2km程離れた市内に位置する三菱電機の郡山製作所へ向かった。この工場は，敷地内余すところなく施設が建てらた比較的小ぢんまりとした工場で，画像・記憶・音響技術に関連する機器を製作しているとのことであった。我々が見学したところにはベルトコンベアのような大量生産ラインがなく，個別のブースで付加価値の高い製品が多品種少量生産されているとのことであった。展示室でこの工場の主力製品である一連の監視カメラをみたが，カメラとは一見わからない形状のものから全方位監視や暗視機能付きのものまで，その多様さには驚かされた。またAVシアターで高音質大音量のスピーカーからのサウンドをSFX映画とともに聴かされたときにはその迫力に圧倒された。

続いて郡山市の郊外にあるアサヒビール福島工場に到着。ここは省エネルギー対策と廃棄物再資源化の完全実施工場として知られている。工場の外観は巨大な工場そのものであるが，中に入ると騒音もゴミ一つ油一滴もなく，しかもビール製造の各工程には制御室と製品等の分析・検査室以外は人が殆どおらず，機械関連の工場とは趣が全く違っていた。またビールを扱うためだろうか，配管は見た限りではすべてステンレス製であった。ちなみにビールを輸送する配管内は氷点下で加圧されているそうで，その温度と圧力は企業秘密だそうだ。工場内の見学後，出来立ての生ビールを試飲しながら，省エネルギーや廃棄物再資源化の具体的取り組みの説明を受けた。特に廃棄物のリサイクルは，国際環境規格ISO 14001の認定を受けた工場だけあって再資源化率100%であり，ビール製造工程の直接的な副産物・廃棄物であるモルトフィード・余剰酵母や王冠・アルミ缶等のみならず瓶のラベルから蛍光灯や乾電池など工場内で使用するすべてのものにまで及んでいるのには少なからず驚いた。このためには工場内いたるところで廃棄物の徹底的な分別が行われているとのことで，地球環境保全には技術の開発と同時にゴミを出す我々の意識改革が不可欠であることを再認識させられる貴重な体験であった。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

工場見学後，隣接するビール園で昼食をとり，午後は会津若松に向かった。途中，猪苗代湖畔の野口英世記念館に立ち寄って偉人の足跡を訪ね，近くにある薄焼き饅頭の店で手先の器用さを測るバロメータのような饅頭づくりに挑戦した。会津若松市に到着し，小雨の中駆け足で鶴ヶ城を見学した。雨でなければ晩夏の会津路を堪能できたろうに，残念であった。その後，郡山に戻って解散となった。

今回の秋季講演会は，冒頭でも述べたように参加者が例年よりも少なかった点を除けば，順調であった。しかし学術講演会としてはこの点が最大の問題で，これに対する会員諸氏のご意見・妙案があれば委員会宛にお寄せいただきたい。なお今回は，見学工場との交渉を始め，随所で郡山コンベンションビューローの方々に大変お世話になった。この場を借りてお礼申し上げます。

（東京都立科学技術大学・学術講演会委員会委員長）

1999年度第2回見学会および技術懇談会報告

長谷川　好道
HASEGAWA Yoshimichi

平成11年10月15日㈮に川崎重工株式会社殿明石工場の見学および技術懇談会が開催されました。参加者は総勢37名で大学関係，ガスタービンメーカー，ガス会社，機器メーカー等幅広い分野の参加がありました。

開催に先立ち，速水地方委員会委員長より地方委員会の位置づけの説明と今回の見学を快諾いただいた川崎重工㈱殿に謝辞が述べられました。その後星野汎用ガスタービン事業部長殿のご挨拶に引き続き長友プロジェクト部部長殿による工場概要の説明がありました。

本明石工場は昭和15年に航空機エンジンの専用工場として誕生，現在基礎研究，データシステム，二輪車，汎用エンジン，産業用ロボット，ジェットエンジン，汎用ガスタービンなど7部門3,600名強の従業員による幅広い製品を生産している主力工場の一つとのことです。

今回は汎用ガスタービン事業部で生産されている産業用ガスタービン発電装置の組立・運転場およびセラミックガスタービン（CGT）の見学をさせていただいた。組立の流れはタクト方式により，予め運転試験を完了したガスタービン本体を共通台板の上で減速機，発電機等と直結し，発電装置として完成する。そしてそのラインの隣にある運転設備で総合運転の立会が受けられるようになっている。CGTはNEDOプロジェクトの一つとして開発完了されたもので，そのカットモデルと運転試験設備について説明を受け，種々質疑応答がなされた。

工場見学に続いて技術懇談会を開催，下記テーマについて話題提供を頂き活発な質疑応答が行われた。

(1)　アクテイブノイズコントローラーによるガスタービン排気騒音の低減
　　大阪ガス㈱　国分　一郎氏

(2)　最近の中・小型コージェネレーション
　　川崎重工㈱　中安　稔氏

最後に，ご多忙中のところ，見学のお世話をいただきました川崎重工㈱および技術懇談会での話題を提供いただきました方々に厚くお礼申し上げます。

（ダイハツディーゼル㈱，地方委員会委員）

〔お詫びと訂正〕

日本ガスタービン学会誌1999年9月号（Vol. 27 No. 5）のガスタービン基礎講座－ガスタービンと流体工学(3)－において誤りがありました。お詫びを申し上げるとともに右記のように訂正させていただきます。　（著　者）

場　所	誤	正
p 47　式(5.2'), (5.10)	$\boldsymbol{\gamma}$	$\mathbf{r}$
p 47　右段　10行目	$H_t = cpT_t$	$h_t = c_p T_t$
p 47　右段　18行目	$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{V} + \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}$, $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}$	$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{V} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$, $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$
p 47　式(5.11)右辺	$= \frac{D\mathbf{U}}{Dt}$	$= -\frac{D\mathbf{U}}{Dt}$
p 47　式(5.12)右辺	$+(\boldsymbol{W}+\mathbf{U})$	$-(\boldsymbol{W}+\mathbf{U})$
p 46　右段21行目，p 48式(6.6)右辺	γM^2	γM
p 48　式(6.7)	$\frac{\partial p_n}{\partial r} = \rho r \omega^2$	$\frac{1}{p_n}\frac{\partial p_n}{\partial r} = \frac{\rho}{p} r \omega^2$
p 49　式(6.10)	$\beta \rho r \Delta r \omega^2$ $\beta = -\frac{2\rho a A}{\gamma M_r}(\cdots)^{-1}$	$\beta \rho r \Delta r \omega^2 p_r / p$ $\beta = -\frac{2\rho a A}{\gamma M_r p_r}(\cdots)^{-1}$
p 49　右段9, 10, 11, 42行目	接点	節点

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

工場見学後，隣接するビール園で昼食をとり，午後は会津若松に向かった。途中，猪苗代湖畔の野口英世記念館に立ち寄って偉人の足跡を訪ね，近くにある薄焼き饅頭の店で手先の器用さを測るバロメータのような饅頭づくりに挑戦した。会津若松市に到着し，小雨の中駆け足で鶴ヶ城を見学した。雨でなければ晩夏の会津路を堪能できたろうに，残念であった。その後，郡山に戻って解散となった。

今回の秋季講演会は，冒頭でも述べたように参加者が例年よりも少なかった点を除けば，順調であった。しかし学術講演会としてはこの点が最大の問題で，これに対する会員諸氏のご意見・妙案があれば委員会宛にお寄せいただきたい。なお今回は，見学工場との交渉を始め，随所で郡山コンベンションビューローの方々に大変お世話になった。この場を借りてお礼申し上げます。

（東京都立科学技術大学・学術講演会委員会委員長）

1999年度第2回見学会および技術懇談会報告

長谷川　好道
HASEGAWA Yoshimichi

平成11年10月15日㈮に川崎重工株式会社殿明石工場の見学および技術懇談会が開催されました。参加者は総勢37名で大学関係，ガスタービンメーカー，ガス会社，機器メーカー等幅広い分野の参加がありました。

開催に先立ち，速水地方委員会委員長より地方委員会の位置づけの説明と今回の見学を快諾いただいた川崎重工㈱殿に謝辞が述べられました。その後星野汎用ガスタービン事業部長殿のご挨拶に引き続き長友プロジェクト部部長殿による工場概要の説明がありました。

本明石工場は昭和15年に航空機エンジンの専用工場として誕生，現在基礎研究，データシステム，二輪車，汎用エンジン，産業用ロボット，ジェットエンジン，汎用ガスタービンなど7部門3,600名強の従業員による幅広い製品を生産している主力工場の一つとのことです。

今回は汎用ガスタービン事業部で生産されている産業用ガスタービン発電装置の組立・運転場およびセラミックガスタービン（CGT）の見学をさせていただいた。組立の流れはタクト方式により，予め運転試験を完了したガスタービン本体を共通台板の上で減速機，発電機等と直結し，発電装置として完成する。そしてそのラインの隣にある運転設備で総合運転の立会が受けられるようになっている。CGTはNEDOプロジェクトの一つとして開発完了されたもので，そのカットモデルと運転試験設備について説明を受け，種々質疑応答がなされた。

工場見学に続いて技術懇談会を開催，下記テーマについて話題提供を頂き活発な質疑応答が行われた。

(1)　アクテイブノイズコントローラーによるガスタービン排気騒音の低減
　　大阪ガス㈱　国分　一郎氏

(2)　最近の中・小型コージェネレーション
　　川崎重工㈱　中安　稔氏

最後に，ご多忙中のところ，見学のお世話をいただきました川崎重工㈱および技術懇談会での話題を提供いただきました方々に厚くお礼申し上げます。

（ダイハツディーゼル㈱，地方委員会委員）

〔お詫びと訂正〕

日本ガスタービン学会誌1999年9月号（Vol. 27 No. 5）のガスタービン基礎講座－ガスタービンと流体工学(3)－において誤りがありました。お詫びを申し上げるとともに右記のように訂正させていただきます。　（著　者）

場　所	誤	正
p 47　式(5.2'), (5.10)	$\boldsymbol{\gamma}$	$\mathbf{r}$
p 47　右段　10行目	$H_t = cpT_t$	$h_t = c_p T_t$
p 47　右段　18行目	$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{V} + \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}$, $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}$	$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{V} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$, $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$
p 47　式(5.11)右辺	$= \frac{D\mathbf{U}}{Dt}$	$= -\frac{D\mathbf{U}}{Dt}$
p 47　式(5.12)右辺	$+(\boldsymbol{W}+\mathbf{U})$	$-(\boldsymbol{W}+\mathbf{U})$
p 46　右段21行目，p 48式(6.6)右辺	γM^2	γM
p 48　式(6.7)	$\frac{\partial p_n}{\partial r} = \rho r \omega^2$	$\frac{1}{p_n}\frac{\partial p_n}{\partial r} = \frac{\rho}{p} r \omega^2$
p 49　式(6.10)	$\beta \rho r \Delta r \omega^2$ $\beta = -\frac{2\rho a A}{\gamma M_r}(\cdots)^{-1}$	$\beta \rho r \Delta r \omega^2 p_r / p$ $\beta = -\frac{2\rho a A}{\gamma M_r p_r}(\cdots)^{-1}$
p 49　右段9, 10, 11, 42行目	接点	節点

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

1999年度第3回見学会および技術フォーラムのお知らせ

1999年度第3回見学会および技術フォーラムを下記の要領で開催を致します。今回はマイクロガスタービンの見学およびマイクロガスタービンに関連する技術課題についてのフォーラムを開きますので奮ってご参加下さい。

記

1．日時　2000年2月18日㈮　13：20～16：40

2．見学先　東邦ガス株式会社　総合技術研究所
東海市新宝町507－2

3．内容概要
（スケジュール等詳細につきましては次号に掲載）

見学会
・東邦ガス総合技術研究所概要説明
・トヨタタービンアンドシステム製ガスタービンの説明及び見学

フォーラム
・マイクロガスタービン要素及び周辺機器の技術課題等の話題提供を予定

4．参加要領
1）定員50名（定員超過の場合は抽選，全員にお知らせします。）
2）申し込み方法：下記の申込書にご記入の上，FAX又は郵送にて学会事務局へお送り下さい。
3）参加費：3000円当日お支払い下さい。

見学会参加申込書

申込締切日（2000年2月4日）開　催　日（2000年2月18日）

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

氏　名			
勤務先			
勤務先住　所	〒		
TEL		FAX	
連絡先	〒		
E-mail			

◇ 1999年度会費納入のお願い ◇

1999年度の会費を未納の方は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，1999年度は1999年4月23日貴口座より引落しさせていただきました。

賛助会員	1口	70,000円
正 会 員		5,000円
学生会員		2,500円

郵便為替	00170－9－179578
銀　行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座　1703707

いずれも口座名は㈳日本ガスタービン学会です。

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが，未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上，事務局宛お送り下さい。自動振替を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。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

1999年度第3回見学会および技術フォーラムのお知らせ

1999年度第3回見学会および技術フォーラムを下記の要領で開催を致します。今回はマイクロガスタービンの見学およびマイクロガスタービンに関連する技術課題についてのフォーラムを開きますので奮ってご参加下さい。

記

1．日時　2000年2月18日㈮　13：20～16：40

2．見学先　東邦ガス株式会社　総合技術研究所
東海市新宝町507－2

3．内容概要
（スケジュール等詳細につきましては次号に掲載）

見学会
・東邦ガス総合技術研究所概要説明
・トヨタタービンアンドシステム製ガスタービンの説明及び見学

フォーラム
・マイクロガスタービン要素及び周辺機器の技術課題等の話題提供を予定

4．参加要領
1）定員50名（定員超過の場合は抽選，全員にお知らせします。）
2）申し込み方法：下記の申込書にご記入の上，FAX又は郵送にて学会事務局へお送り下さい。
3）参加費：3000円当日お支払い下さい。

見学会参加申込書

申込締切日（2000年2月4日）開　催　日（2000年2月18日）

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

氏　名			
勤務先			
勤務先住　所	〒		
TEL		FAX	
連絡先	〒		
E-mail			

◇ 1999年度会費納入のお願い ◇

1999年度の会費を未納の方は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，1999年度は1999年4月23日貴口座より引落しさせていただきました。

賛助会員	1口	70,000円
正 会 員		5,000円
学生会員		2,500円

郵便為替	00170－9－179578
銀　行	第一勧業銀行西新宿支店
	普通預金口座　1703707

いずれも口座名は㈳日本ガスタービン学会です。

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが，未だ手続きをなさっていない方は巻末の振替依頼書に御記入の上，事務局宛お送り下さい。自動振替を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。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

平成12年度学術講演会・講演論文募集のお知らせ

下記の日程で，日本ガスタービン学会（幹事学会）と日本機械学会の共催による第28回ガスタービン定期講演会および第15回秋季講演会を開催します。

1．第28回ガスタービン定期講演会・講演論文募集

第28回定期講演会は，東京都立科学技術大学で開催いたします。期日までに所定の手続により講演の申し込みをお願いします。

開　催　日　2000年（平成12年）6月2日㈮
開 催 場 所　東京都立科学技術大学
東京都日野市旭ヶ丘6-6
講演申込締切　2000年（平成12年）1月14日㈮
講演原稿締切　2000年（平成12年）4月 7 日㈮

募 集 論 文

応募論文は，ガスタービン及びターボ機械に関する最近の研究で未発表のものとします。一部既発表部分を含む場合には未発表部分が主体となるものに限ります。

一般講演セッション及びオーガナイズドセッションにおける研究発表をご検討ください。

(1) 一般講演セッション

ガスタービン及び過給機ならびにそれらの応用に関する理論や技術を扱ったもので，ガスタービン本体のみならず，補機・付属品，ガスタービンを含むシステム及びユーザーの実績等も歓迎します。

(2) オーガナイズドセッション

下記のオーガナイズドセッションを企画します。講演数の制約，あるいは講演の内容により一般講演への変更をお願いする場合があります。

超小型ガスタービン関連
－用途・目的や開発の現状と問題点

講演者の資格

本会会員もしくは日本機械学会会員で，1人1題目に限ります。

講演申込方法と採否の決定

本号掲載の申込書に必要事項を記入し，日本ガスタービン学会事務局に郵送してください。郵便未着（事故）の場合もありますので，送付されたことを電話・FAX等でご連絡ください。（先にFAXで申し込みを行った場合も，必ず申込書を郵送してください。）締切後の申し込みは受け付けません。

なお，講演申込後の講演題目，講演者，連名者の変更は受け付けません。

申込先

〒160-0023　東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
㈳日本ガスタービン学会
TEL：03-3365-0095　FAX：03-3365-0387

講演発表の採否は幹事学会において決定し，2月10日までに結果をご連絡します。

講演原稿の提出

講演者は講演原稿を講演論文集原稿執筆要領に従って，A4用紙44字×40行（1ページ）2～6ページで作成し，所定の講演論文原稿表紙と共に期限までに提出して下さい。提出された原稿はそのままの寸法で印刷し，学術講演会講演論文集（A4版）を作成します。原稿執筆要領および原稿表紙用紙は採否の連絡に同封してお送りします。

技術論文としての学会誌への投稿

(1) 原稿執筆要領に記載の要件を満たす講演論文は，著者の希望により，講演会終了後に技術論文として受理され，校閲を経て日本ガスタービン学会誌に掲載されます。技術論文投稿を希望される場合は，講演論文原稿提出時に原稿表紙の所定欄に希望ありと記入し，さらに技術論文原稿表紙，論文コピー2部，英文アブストラクトを添付していただきます。詳細は原稿執筆要領をご覧ください。

(2) 講演者が日本機械学会会員であり，同学会出版物（論文集およびInternational Journal）への投稿を希望される場合は，日本機械学会の所定の手続きを経て投稿することとなります。

2．第15回ガスタービン秋季講演会（北九州市）・見学会

平成12年度のガスタービン秋季講演会は北九州市にて開催致します。講演募集，見学会等の詳細は学会誌2000年1月号以後の会告でお知らせします。

開　催　日　2000年（平成12年）11月9日㈭，10日㈮
開 催 場 所　福岡県北九州市　北九州国際会議場

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/03/21.

＊コピーしてご使用ください。　　（講演申込書）

第28回ガスタービン定期講演会講演申込み

講演題目：

希望セッション：一般講演・オーガナイズドセッション（　　）

著者氏名（講演者に○印）	学校・勤務先（略　称）	所属学会（GTSJ・JSME・他）	会員資格（正会員・学生会員）

連絡者氏名：　　会員番号：

学校・勤務先：

所在地：〒　　－

TEL：（　　）　　－　　FAX：（　　）　　－

講演内容（100～200字）

講演申込期限は2000年1月14日㈮です。早めにお申し込みください。
講演申込後の講演題目，著者氏名等の変更は受け付けませんのでご注意下さい。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21

編集後記

11月号は普通号としてお届けします。随筆としては「最近気になっていること」と題し，高原北雄氏より工学教育に携わった現場でのご苦労や創意工夫を始めとして，最近の世情まで情熱を込めて語って頂きました。頁数も随筆としては異例の長さとなりましたが，著者の熱意が読者に伝わってくると思います。

論説・解説の項では，早くからガスタービンのライバル機種としての燃料電池と最近話題のマイクロガスタービンを採り上げる予定でしたが，後者については丁度夏休みを挟んでの執筆者のご都合や時期尚早として辞退されたメーカーなどがあり，次の機会に譲ることとしました。替りに過給機の熱流体・熱応力連成解析における事例を載せることとしました。前者については，燃料電池について分かり易く解説頂いたので，ガスタービン関係者にも参考になると思います。ガスタービンの国内外の規格JIS，ISOの現状も関係者として目の離せないところです。

1月号より連載中のガスタービン基礎講座は6回目を迎え，今月より「ガスタービンと伝熱工学」が始まりましたが，伝熱の分野でのCFD技術の活用など最新の技術を反映した内容となっており，次号以降にも興味を抱かせます。

「研究だより」は東京理科大学の本阿弥先生よりご報告頂きました。

「表紙に寄せて」では，防衛庁の了承を得てJ3エンジンについて担当メーカーであるIHI㈱に纏めて頂きました。日本の空を守る航空ジェットエンジンの先駆けとして貴重な写真を提供頂きました。

今月号は記事構成上の変更も多く，関係の方々のご苦労を煩わしましたが，最近どこの職場でも整備されたEメールを活用（多用？）することにより，担当委員だけの小委員会を開催することもなく，定例の編集委員会だけで編集作業を済ますことができたのは，各事業所で多忙な毎日を過ごしている委員の負担を少しでも軽減する意味で，大きな収穫でした。

最後に今月号の記事を纏めるに当り，ご多忙中原稿をご執筆頂いた著者の方々に改めて御礼申し上げます。なお，本号の編集は伊東委員，佐々木(祥)委員，濱崎委員と星野の4名で担当致しました。　（星野　和貞）

〈表紙写真〉

J3エンジン

説明：昭和30年代前半に開発された1軸ターボジェットエンジンで，軸流8段圧縮機，軸流1段タービンを持つ。生産台数は約250台を数え，搭載機体はT－1B中等ジェット練習機，P－2J。現在も約30台がT－1B用エンジンとして現役で使用されている。　（提供　石川島播磨重工業株式会社）

☘事務局だより✉☘

東京も暑い暑いと騒いでいるうちに涼しさを通り越して急に寒くなってしまいました。もっとももう11月ですから，あたりまえなのですが…。

さて，今事務局は大混乱中。なんせ国際会議開催まで秒読み段階にもかかわらず，しなければならない事が次々と出てきているのです。気持が焦ってくる上に隣のビルが建て直しで解体のため，我がビルも揺れに揺れ慢性船酔い状態。はじめの頃は夕方になると気持ちが悪くなっていましたが，それも1ヶ月半続くとようやく慣れ，一息ついたのもつかの間，今度は騒音。電話の声が聞こえず，自然と声を張り上げるので，話終わった後疲れること疲れること。

今回は業者への業務委託は国際会議事務業務の一部なのでいきおいガスタービン学会がお手伝いすることになります。こちらの事務局スタッフも3名ですから，今は全員がその業務にかかりきりです。会議に関する問い合わせも当学会へまいりますので開催近くなった今はほとんど電話が鳴りっぱなしという状況です。そこへもってきて隣のガンガンですから，そのありさまご想像いただけると思います。

その国際会議もこの学会誌が皆様のお手元に届く頃には終了しています。今は目の前の様々な事柄をいかに処理していくかに頭を悩ませていますが，とにかく多くの方に参加していただいて盛会になるよう祈るばかりです。

国際会議が終わると，1月には慣例のセミナーです。今，お問い合わせが相次いでいるマイクロガスタービンも取り上げられておりますので，きっと参加者も多いことと期待しております。

学会誌が年6回刊行になりましたので，会告はすべて会誌に掲載することになりました。お見逃しなきよう…。

[A]

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

編集後記

11月号は普通号としてお届けします。随筆としては「最近気になっていること」と題し，高原北雄氏より工学教育に携わった現場でのご苦労や創意工夫を始めとして，最近の世情まで情熱を込めて語って頂きました。頁数も随筆としては異例の長さとなりましたが，著者の熱意が読者に伝わってくると思います。

論説・解説の項では，早くからガスタービンのライバル機種としての燃料電池と最近話題のマイクロガスタービンを採り上げる予定でしたが，後者については丁度夏休みを挟んでの執筆者のご都合や時期尚早として辞退されたメーカーなどがあり，次の機会に譲ることとしました。替りに過給機の熱流体・熱応力連成解析における事例を載せることとしました。前者については，燃料電池について分かり易く解説頂いたので，ガスタービン関係者にも参考になると思います。ガスタービンの国内外の規格JIS，ISOの現状も関係者として目の離せないところです。

1月号より連載中のガスタービン基礎講座は6回目を迎え，今月より「ガスタービンと伝熱工学」が始まりましたが，伝熱の分野でのCFD技術の活用など最新の技術を反映した内容となっており，次号以降にも興味を抱かせます。

「研究だより」は東京理科大学の本阿弥先生よりご報告頂きました。

「表紙に寄せて」では，防衛庁の了承を得てJ3エンジンについて担当メーカーであるIHI㈱に纏めて頂きました。日本の空を守る航空ジェットエンジンの先駆けとして貴重な写真を提供頂きました。

今月号は記事構成上の変更も多く，関係の方々のご苦労を煩わしましたが，最近どこの職場でも整備されたEメールを活用（多用？）することにより，担当委員だけの小委員会を開催することもなく，定例の編集委員会だけで編集作業を済ますことができたのは，各事業所で多忙な毎日を過ごしている委員の負担を少しでも軽減する意味で，大きな収穫でした。

最後に今月号の記事を纏めるに当り，ご多忙中原稿をご執筆頂いた著者の方々に改めて御礼申し上げます。なお，本号の編集は伊東委員，佐々木(祥)委員，濱崎委員と星野の4名で担当致しました。　（星野　和貞）

〈表紙写真〉

J3エンジン

説明：昭和30年代前半に開発された1軸ターボジェットエンジンで，軸流8段圧縮機，軸流1段タービンを持つ。生産台数は約250台を数え，搭載機体はT－1B中等ジェット練習機，P－2J。現在も約30台がT－1B用エンジンとして現役で使用されている。　（提供　石川島播磨重工業株式会社）

☘事務局だより✉☘

東京も暑い暑いと騒いでいるうちに涼しさを通り越して急に寒くなってしまいました。もっとももう11月ですから，あたりまえなのですが…。

さて，今事務局は大混乱中。なんせ国際会議開催まで秒読み段階にもかかわらず，しなければならない事が次々と出てきているのです。気持が焦ってくる上に隣のビルが建て直しで解体のため，我がビルも揺れに揺れ慢性船酔い状態。はじめの頃は夕方になると気持ちが悪くなっていましたが，それも1ヶ月半続くとようやく慣れ，一息ついたのもつかの間，今度は騒音。電話の声が聞こえず，自然と声を張り上げるので，話終わった後疲れること疲れること。

今回は業者への業務委託は国際会議事務業務の一部なのでいきおいガスタービン学会がお手伝いすることになります。こちらの事務局スタッフも3名ですから，今は全員がその業務にかかりきりです。会議に関する問い合わせも当学会へまいりますので開催近くなった今はほとんど電話が鳴りっぱなしという状況です。そこへもってきて隣のガンガンですから，そのありさまご想像いただけると思います。

その国際会議もこの学会誌が皆様のお手元に届く頃には終了しています。今は目の前の様々な事柄をいかに処理していくかに頭を悩ませていますが，とにかく多くの方に参加していただいて盛会になるよう祈るばかりです。

国際会議が終わると，1月には慣例のセミナーです。今，お問い合わせが相次いでいるマイクロガスタービンも取り上げられておりますので，きっと参加者も多いことと期待しております。

学会誌が年6回刊行になりましたので，会告はすべて会誌に掲載することになりました。お見逃しなきよう…。

[A]

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

学会誌編集規定

1996.2.8 改訂

1．本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。

A．投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

B．依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。

C．学会原稿学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

2．依頼原稿および投稿原稿は，ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説，講義，技術論文，速報（研究速報，技術速報），寄書（研究だより，見聞記，新製品・新設備紹介），随筆，書評，情報欄記事，その他とする。刷り上がりページ数は原則として，1編につき次のページ数以内とする。

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

3．執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。

4．会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は，編集委員会が定める方法により審査され，編集委員会の承認を得て，学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては，別に技術論文投稿規定を定める。

5．依頼原稿および学会原稿についても，編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は，査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。

6．依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。

7．本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。

8．著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を，本学会誌に掲載されたことを明記したうえで，転載，翻訳，翻案などの形で利用する場合，本会は原則としてこれを妨げない。ただし，著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は，文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1．原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0003 東京都港区西新橋 1-17-5
Tel. 03-3508-9061　Fax. 03-3580-9217
ニッセイエブロ㈱　制作部デジタル編集課
学会誌担当　鬼塚詠子・越司　昭

技術論文投稿規定

1997.1.28 改訂

1．本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

1）主たる著者は本学会会員であること。

2）投稿原稿は著者の原著で，ガスタービン及び過給機の技術に関連するものであること。

3）投稿原稿は，一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし，要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2．使用言語は原則として日本語とする。ただし，著者が外国人会員であって日本語による論文執筆が困難な場合は英語による投稿を認める。

3．投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし，1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4．図・写真等について，著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5．投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し，正原稿1部副原稿（コピー）2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6．原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7．投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し，編集委員会で採否を決定する。

8．論文内容についての責任は，すべて著者が負う。

9．本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては，学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.27　No.6　1999.11
発行日　1999年11月20日
発行所　社団法人日本ガスタービン学会
編集者　益田重明
発行者　菅　　進
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13
第3工新ビル 402
Tel. 03-3365-0095　Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0003　東京都港区西新橋 2-5-10
Tel. 03-3501-5151　Fax. 03-3501-5717

©1999, ㈳日本ガスタービン学会

複写される方へ

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

〒170-0052　東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル
学術著作権協会
TEL：03-3475-5618　FAX：03-3475-5619
E-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

平成11年11月

ＧＴＳＪガスタービンセミナー（第２８回）のお知らせ

「２１世紀を担うガスタービンを目指して」をテーマに第28回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたしますので、奮ってご参加ください。

１．日　時　：　平成１２年1月２０日（木）
　　1月２１日（金）

２．場　所　：　東京ガス（株）本社２階大会議室（地図参照）
　　港区海岸1-5-20　Tel03-3433-2111（ＪＲ浜松町駅徒歩３分）

３．主　催　：　（社）日本ガスタービン学会

４．協　賛　：　エネルギー・資源学会，火力原子力発電技術協会，計測自動制御学会，自動車技術会，ターボ機械協会，電気学会，日本エネルギー学会，日本ガス協会，日本機械学会，日本金属学会，日本コージェネレーションセンター，日本航空宇宙学会，日本航空技術協会，日本セラミックス協会，日本材料学会，日本鉄鋼協会，日本内燃機関連合会，日本内燃力発電設備協会，日本舶用機関学会，日本非破壊検査協会，日本品質管理学会，腐食防食協会，溶接学会

５．セミナープログラム

1月２０日（木）　　サブテーマ　：　分散電源としての活躍が期待されるマイクロタービンと燃料電池

※下記講演時間には質疑応答の時間も含まれます。

	項　　目	時　　間	講　　師
1	系統から見た分散型電源の大規模導入のための技術課題	９：３０－１０：３０	(財)電力中央研究所 石　川　忠　夫　氏
2	分散型電源としての固体高分子型燃料電池の開発状況	１０：３０－１１：３０	筑波大学名誉教授 (財)燃料電池開発情報センター 本　間　琢　也　氏
3	溶融炭酸塩型燃料電池発電技術の開発	１３：１０－１４：１０	(財)電力中央研究所 渡　辺　隆　夫　氏
4	３００Ｋｗ級マイクロガスタービンを使ったコージェネシステムの開発	１４：１０－１５：１０	㈱ トヨタタービンアンドシステム 岡　林　慶　一　氏
5	マイクロタービンを使用したコージェネシステムについて	１５：３０－１６：３０	東京ガス(株) 徳　本　　勉　氏

1月２１日（金）　　サブテーマ　：　２１世紀に向けてへのガスタービン最新技術

	項　　目	時　　間	講　　師
6	航空用ガスタービンの先端技術－低ＮＯｘ燃焼技術－	９：３０－１０：３０	航空宇宙技術研究所 林　　茂　氏
7	Ｎｉ基超合金開発の現状と新材料の可能性	１０：３０－１１：３０	金属材料技術研究所 原　田　広　史　氏
8	ＡＢＢガスタービンの先端技術	１３：１０－１４：１０	ジャパンガスタービン(株) 横　山　　寛　氏
9	1500℃級ガスタービンの開発とその運転実績	１４：１０－１５：１０	三菱重工業(株) 岩　崎　　洋　一　氏
１０	シーメンスの一軸型コンバインドサイクルプラント	１５：３０－１６：３０	富士電機(株) 明　翫　市　郎　氏

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

6．　セミナーの内容

（1）「系統から見た分散型電源の大規模導入のための技術課題」

（(財)電力中央研究所　石川　忠夫氏）

電力系統，特に配電系統に小規模の分散型電源が連系されると，電力品質，事故時の保護対策，設備の保安・保全などに対して様々な影響が考えられる。そこで，分散型電源の系統連系によって生じる問題点を整理し，それを解決するための技術の動向について解説する。また，これらの技術開発の結果を用いて制定されてきた系統連系に関するガイドラインについて解説する。

（2）「分散型電源としての固体高分子型燃料電池の開発状況」

（筑波大学名誉教授・(財)燃料電池開発情報センター　本間　琢也氏）

主に自動車や船舶等移動体用エンジンとして開発が進められている固体高分子型燃料電池は，又家庭におけるコジェネレーションやポータブル電源，更にコンピュータ等電子機器用電源としての利用も期待されており，現在最も注目されている燃料電池の種類である。セミナーでは同種燃料電池の世界に於ける開発の動向，将来展望について述べる。

（3）「溶融炭酸塩型燃料電池発電技術の開発」

（(財)電力中央研究所　渡辺　隆夫氏）

溶融炭酸塩型燃料電池(MCFC)は 600～700℃で作動する高温型の燃料電池であり，高温・高圧の排ガスが得られることから，ガスタービン圧縮機等との組合せにより，プラント全体の効率を高めることができ，天然ガスを用いた分散型でも 50％以上の効率が期待できる。さらに，最終的には石炭ガス化装置との組合せによる大規模複合発電も想定されている。本燃料電池は，国の開発計画において，1MW プラントの開発が行われ，また，電池本体については，加圧条件下で 1 万時間の連続運転が実証された。現在これらの成果に基づき，より高性能，高信頼性，低コスト化に向けた開発が継続されている。

本講演では，分散型や火力代替型の高効率複合発電を目指した MCFC 発電技術の最新の進捗状況を報告する。

（4）「３００Kw級マイクロガスタービンを使ったコージェネシステムの開発」

（(株) トヨタタービンアンドシステム　岡林　慶一氏）

エネルギー消費の削減或いはCO_2量低減の要求の高まりの中で大容量を中心にコージェネレーションがかなり普及してきた。近年はこの動きが中小規模需要家にも広まりつつあり，ここでは主にレシプロエンジンが使われている。しかし，使用環境によっては低ＮＯｘ，低振動或いは高い蒸気圧などが求められガスタービン利用のシステムの方が有効なケースも多い。この度，３００Kw級のマイクロガスタービンを開発し，これを利用した各種コージェネレーションシステムを開発したのでそれらの技術的特徴を中心に紹介する。

（5）「マイクロタービンを使用したコージェネシステムについて」

（東京ガス(株)　徳本　勉氏）

近年欧米において新たな分散型電源として注目されている発電出力１００ｋW未満のマイクロタービンについて，東京ガス(株)では日本市場への導入を検討しており，既に試験機を入手した米国アライドシグナル社，キャプストン社の製品に対する技術評価並びにこれを使用したコージェネシステムの設計を行っている。本講では，これらの概要を述べると共に，市場導入の意義および課題，その他マイクロタービンメーカーの動向等について合わせて紹介する。

（6）「航空用ガスタービンの先端技術－低ＮＯｘ燃焼技術－」

（航空宇宙技術研究所　林　茂氏）

航空輸送は今後も年率３％～４％の成長を続けると予想されており，来世紀半ばには航空機排気が地球大気に無視できない影響を与える可能性が指摘されている。ICAO（国際民間航空機関）では，LTO（離着陸）サイクルでのNOx排出削減を求める新基準を2003年から実施することを決めるとともに，新たに巡航時のNOx排出基準を導入することを検討している。また，欧州では，NOxの排出に応じた空港使用料の徴収や航空燃料への課税などが現実になっている。このような状況において，低燃費とともに低NOx排出はエンジンの大きなセールスポイントとなることから今後，ダブルアニュラー燃焼器での燃料ステージングに続き，これまでの研究開発の成果の実用化が一層加速されると見られる。ここでは様々なレベルの低NOx燃焼技術を紹介するとともに，今後予想される高温・高圧化や燃焼器ライナー用耐熱材料などとの関わりについて述べる。

（7）「Ｎｉ基超合金開発の現状と新材料の可能性」

（金属材料技術研究所　原田　広史氏）

Ni 基超合金，特に単結晶超合金はレニウムを５％以上含む第3世代合金まで開発が進み，ジェットエンジンのＨＰ第１段動翼や無冷却のＩＰ動翼などに用いられている。さらに耐用温度向上をねらって第４世代合金の開発が進められている。発電用ガスタービンでは，1500℃級での蒸気冷却などに対応して第２世代単結晶合金の適用が検討されている。このような材料開発の現状と今後の方向について国内および欧米の材料開発プロジェクトの動向もあわせ述べる。さらに Ni 基酸化物分散強化（ＯＤＳ）合金，セラミック，高融点合金などの研究開発の現状と可能性についても述べる。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

（8）「ＡＢＢガスタービンの先端技術」

（ジャパンガスタービン(株)　横山　寛氏）

従来，ガスタービンの高効率化・高出力はタービン入口温度を上げることによって行われた。この方法は未だ物理的には限界に達しているのではないが，さらに温度を上げるとＮＯｘ値が高くなり，高級材料および手のこんだ冷却技術が必要になる。また，信頼性，初期投資，保守費用の面では，高温化の利点を相殺するようなリスクがある。ＡＢＢは高効率と低ＮＯｘを同時に満たすため種々のサイクルについて検討を重ねた。その結果，再熱燃焼方式がもっとも簡単で，かつ，もっとも効果的であることがわかった。

ＡＢＢは再熱燃焼サイクルについて多くの実績があり，これに新技術を加味して開発したのが６０Ｈｚ用のＧＴ２４と，これを５０Ｈｚ用に相似設計したＧＴ２６である。これらのガスタービンは，コンパクトで比出力が大きく，高効率，高信頼性および低ＮＯｘである。

（9）「1500℃級ガスタービンの開発とその運転実績」

（三菱重工業(株)　岩崎　洋一氏）

熱効率の高さから脚光を浴びているコンバインドプラントでは，主機であるガスタービンの高温・高性能化によりプラント総合熱効率の大幅な改善が可能である。当社ではガスタービンの開発の豊富な経験を基に，タービン入口温度 1500℃級 G 形ガスタービンの開発に成功した。初号機 60Hz 501G 形ガスタービンは，世界に先駆けて当社高砂製作所のコンバインドプラント実証設備にて，平成 9 年 6 月に運開した。また，1999 年 7 月には事業用としては初めての G シリーズガスタービン 50Hz 機 M701G1 ガスタービンを設置した東北電力株式会社東新潟 4 号系列が運開した。本報では，G 形ガスタービンの開発と最新の運転状況について報告する。

（１０）「シーメンスの一軸型コンバインドサイクルプラント」

（富士電機(株)　明翫　市郎氏）

シーメンス社の最新型ガスタービンである３Ａシリーズ機を採用した，一軸型コンバインドサイクル計画を紹介する。基本コンセプトは，一軸構成のパワートレインを床置き配置したものであり，熱効率面，運転性，保守性でのメリットに加えて土木・建築の費用を大幅に低減できるのが特徴である。プラントの高効率化と設備のコンパクト化に考慮した項目も合せて説明する。次世代の大容量プラントの概要についても触れることとする。

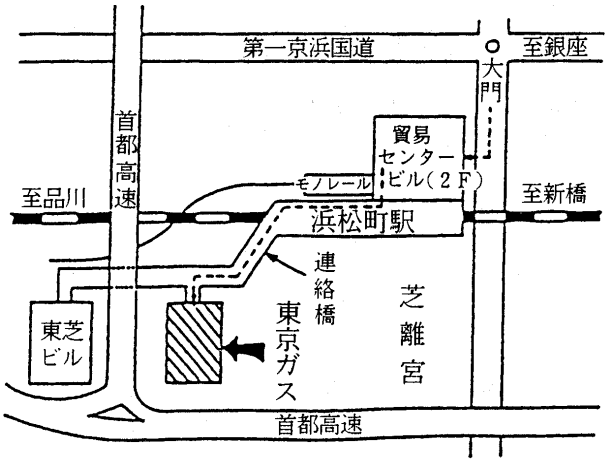
７．　参加要領

１）参　加　費　：　◆主催および協賛団体会員　　２日間　２５，０００円　　１日のみ　１８，０００円
◆学　生　会　員　　５，０００円
◆会　　員　　外　　２日間　３５，０００円　　１日のみ　２５，０００円
◆資　料　の　み　　１冊　５，０００円（残部ある場合）

２）申 込 方 法：　申込書に所属，氏名，加入学協会名，ＧＴＳＪ会員は会員番号等必要事項を明記の上，ＦＡＸ又は郵送にて下記事務局宛平成１２年1月１０日（月）までにお送り下さい。
また，参加費につきましては平成１２年1月１７日（月）までに以下の方法にてお支払い下さい。
・郵便振替　　００１７０－９－１７９５７８（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）１７０３７０７（日本ガスタービン学会）
・現金書留

３）事　務　局　：　〒１６０－００２３　　東京都新宿区西新宿７－５－１３－４０２
(社)日本ガスタービン学会　　Tel.０３-３３６５-００９５　　Fax.０３－３３６５－０３８７
URL. http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/gtsj/ E-Mail gtsj@pluto.dti.ne.jp

＊資料集・ネームカードは当日受付にてお渡しします。



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.

第２８回ガスタービンセミナー

（平成１２年１月２０，２１日）

申　込　書

(社) 日本ガスタービン学会　行

FAX 03-3365-0387　TEL 03-3365-0095

会社名	
所在地	〒
TEL	
FAX	

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

フリガナ 氏　名	所　　属	TEL FAX	所属学協会 GTSJの方は会員No.をご記入下さい	参加日 ○印をつけて下さい
				20・21
				20・21
				20・21
				20・21
				20・21

【事務局への連絡事項】

＊払込方法（○印をつけて下さい）　　参加費入金予定日　　月　　日

1．銀行（第一勧業銀行西新宿支店　普通預金１７０３７０７）
2．郵便振替（００１７０－９－１７９５７８）
3．現金書留
4．当日受付にて支払

＊請求書の発行について
1．要　宛名（　　）　2．不要

＊領収書の発行について（当日お渡しします）
1．要　宛名（　　）　2．不要

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.167, 2025/09/21.