

Ⅱ 流体力学技術のブレークスルーを目指す乱流の知的制御

知的乱流制御研究センター ＊児玉 良明、春海 一佳、吉田 博夫*¹⁾、
川口 靖夫*¹⁾、小川 哲*²⁾

1. はじめに

当研究所では、H12 年度から 5 ヶ年計画で、乱流制御の実現を目標に、独立行政法人航空宇宙技術研究所(以下、航技研)および独立行政法人産業技術総合研究所(以下、産総研)と共に、文部科学省科学技術振興調整費の研究制度である開放的融合研究推進制度の下で、「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」研究プロジェクトを実施している。このプロジェクトは、年間約 3 億円の研究予算をもち、流体関係の基礎研究としては、我が国は勿論恐らく国際的にも、過去に例を見ない大規模な研究であり、当研究所は、分担研究の実施と共に、幹事研究所として研究プロジェクト全体の運営に責任を負っている。今年度は研究の中間年度にあたり、研究のねらいと現在までの主な研究成果についてご報告する。

2. 研究の背景

乱流(turbulence)とは、簡単に言えば微細な渦運動の集合体である。乱流は、実際の流れの殆どは乱流であると言えるほど普遍的な現象であり、物質の混合・拡散さらには燃焼を促進させるなどのプラスの効果をもつが、船舶や航空機が進むとき周りの水や空気から受ける摩擦力を 1 桁以上増加させるなどのマイナスの効果もあり、いずれにしても流体が関係する現象の大部分において大きな影響力をもつ。従って、もしその機構が解明され制御が可能になれば波及効果は計り知れないが、実際は、20 世紀初頭におけるハイゼンベルグの予言「今世紀の最後まで残る物理学の問題は、素粒子論と乱流であろう」にあるように、その極めて複雑な非線形のため、これまで多くの物理学や工学の研究者に注目され研究されてきたにも拘わらず、流体研究において残された最大の課題として存在し続けてきた。

しかし近年、様々な技術の発達により、乱流現象を解明しさらに制御するための環境が急速に整ってきた。発達してきた技術とは、計算機を用いた乱流現象の数値シミュレーション技術、レーザ光を用いた光学的非接触・高分解能流体計測技術、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems : マイクロマシン) 技術を用いたマイクロセンサ・アクチュエータ、制御理論などである。これを受けて本プロジェクトが、陸・海・空をカバーする上記の機械系 3 研究所、さらには大学の研究者を組織して開始された。

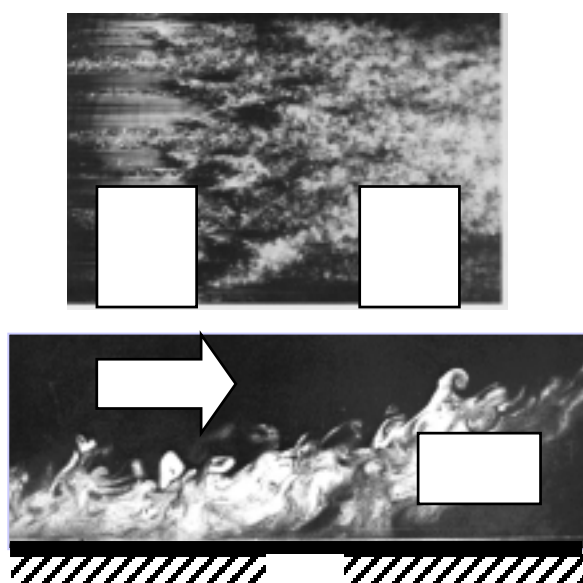
*¹⁾ 独立行政法人産業技術総合研究所。海上技術安全研究所併任。

*²⁾ 独立行政法人航空宇宙技術研究所。海上技術安全研究所併任。

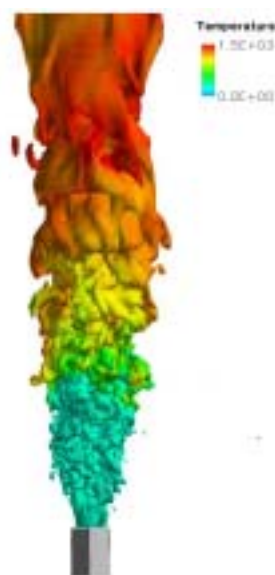
3. 研究の構成

乱流現象は、19 世紀半ばの Osborn Reynolds による発見以来、150 年以上の研究の歴史をもち、しかも依然としてそのメカニズムすら十分に解明されていないという、やっかいな現象である。本プロジェクトは、その乱流をたった 5 年間で、メカニズムの解明だけでなく制御まで実現してしまおうという、極めて野心的な研究である。従って、よほど研究目標を絞り込み、且つ研究努力をそこに集中しないと、成功は期待できない。また同時に、得られた研究成果が大きな波及効果をもつためには、絞り込まれた目標が、乱流と総称される多種多様な流体现象の大きな割合を占める部分に適用できる汎用性をもつ必要がある。

本プロジェクトでは、研究対象とする乱流として、工学分野で現れる主要な乱流形態である壁乱流と自由乱流の 2 つを取り上げた。壁乱流は、航空機・自動車・船舶などの物体が流体中を進むときや管の中の流れにおいて、固体壁面に沿って存在する大きな速度差をもつ薄い領域すなわち境界層の中で発生する強い渦運動であり、摩擦抵抗を非乱流状態(層流とよぶ)に比べて 100 倍程度増大させたり騒音を発生したりする大きな負の効果をもつと同時に、壁・流体間の熱伝達の促進や剥離の抑制という正の効果などをもち、特に輸送機器にとって重要な乱流である。一方、自由乱流は壁面から遠く離れた乱流であり、その中でも流体中にジェットとして噴出される噴流乱流は、周囲の静止流体との間に複雑な渦運動を発生し、強い混合・拡散作用をもつため、流体系の製造過程やエンジン内の燃料と空気の混合および燃焼などに利用され、工学的重要性が高い。



(a)壁乱流



(b)噴流乱流火炎 (水素噴流拡散火炎の数値シミュレーション)

図 1 乱流の 2 つの形態

以上の理由により、本プロジェクトは2つのサブテーマ構成とし、サブテーマ「能動乱流制御」では壁乱流を制御対象として主に摩擦抵抗の低減を研究目標とし、サブテーマ「乱流燃焼制御」では噴流乱流の燃焼を制御対象として希薄予混合燃焼の安定化と有害排出ガスの低減を研究目標として研究に取り組んだ。

4. サブテーマ「能動乱流制御」

(1) 壁乱流の制御のための2つのアプローチ

まず壁乱流の特徴について説明する。壁乱流では、薄い境界層の中でも壁に最も近い部分が渦の発生源であり、そこでの渦生成の挙動を制御できれば、壁乱流全体を制御できる可能性があり、摩擦抵抗を大幅に低減させるなどの実用的な成果に結びつくと期待される。しかも、数値シミュレーションなどによって、壁近くの領域での渦構造は、乱流一般に見られる無秩序なものではなく、図2に示されるように、ストリーク構造と呼ばれる、流れ方向に細長い低圧領域、高圧領域そして縦渦から構成される準秩序的な構造をもつことが分かっている。従って壁乱流は、乱流の中で最も制御に適していると言え、しかも実用的価値が高い。

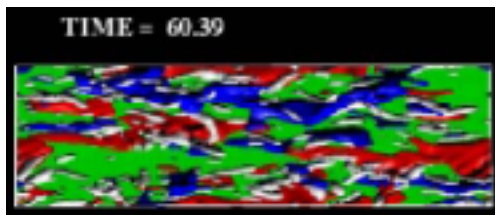


図2 数値シミュレーションにより可視化された壁乱流中のストリーク構造¹⁾。青(濃灰): 低速ストリーク、赤(中灰): 高速ストリーク、灰色(明灰): 渦構造。流れは左から右。

本サブテーマでは、上記の壁乱流の特徴を利用して、図3(a)に示すように、壁面にMEMS技術を用いて製作したマイクロセンサー・アクチュエータ群を埋め込み、それらによってストリーク構造をフィードバック制御²⁾し、乱流を抑制することによって摩擦抵抗を低減させることを第1の目標とした。この手法をSmart skinと呼ぶ。この目標は、乱流の制御が本当に可能であることを実証し、流体力学に関する技術のブレークスルーを実現するという、本研究プロジェクトの最大の目標でもある。

一方、このMEMS技術による摩擦抵抗の低減は、科学的価値は非常に高いが、適用対象面積が広いためコストパフォーマンスの点で問題があり、実用化される可能性は低い。そこで、マイクロセンサー・アクチュエータをポイント的に使用して大きな効果を得られると期待される剥離制御の研究にも取り組んだ。航空機などの翼において剥離が生じると、空力性能が大幅に低下する。これを防ぐため、図3(b)に示すように、剥離が発生しそうな状態をマイクロセンサーにより検知し、マイクロアクチュエータにより乱流を促進させれば、剥離の防止が期待できる。この手法をSmart wingと呼ぶ。そしてこれら2つの手法は共に壁乱流へのMEMS的アプローチに基づくものである。



図3 壁乱流制御へのMEMS的アプローチにおける2つの手法

一方、摩擦抵抗の低減は、地球温暖化対策の必要性が高まる今日、省エネルギー対策として重要である。そこで本サブテーマでは、同じく壁乱流を制御対象として、摩擦抵抗の低減を目的とした実用化の可能性が高い手法を平行して研究することにした。具体的には、水中に少量の気泡を注入して摩擦抵抗を低減させるマイクロバブルと、水への界面活性剤の微量添加による摩擦抵抗の低減と伝熱の制御である。これらは、共に流体の物性を変化させるため、物性的アプローチと呼ぶことにする。マイクロバブルでは、図4(a)に示すように、船舶への適用を、界面活性剤では、図4(b)に示すように、地域冷暖房システムへの適用を念頭に置いている。

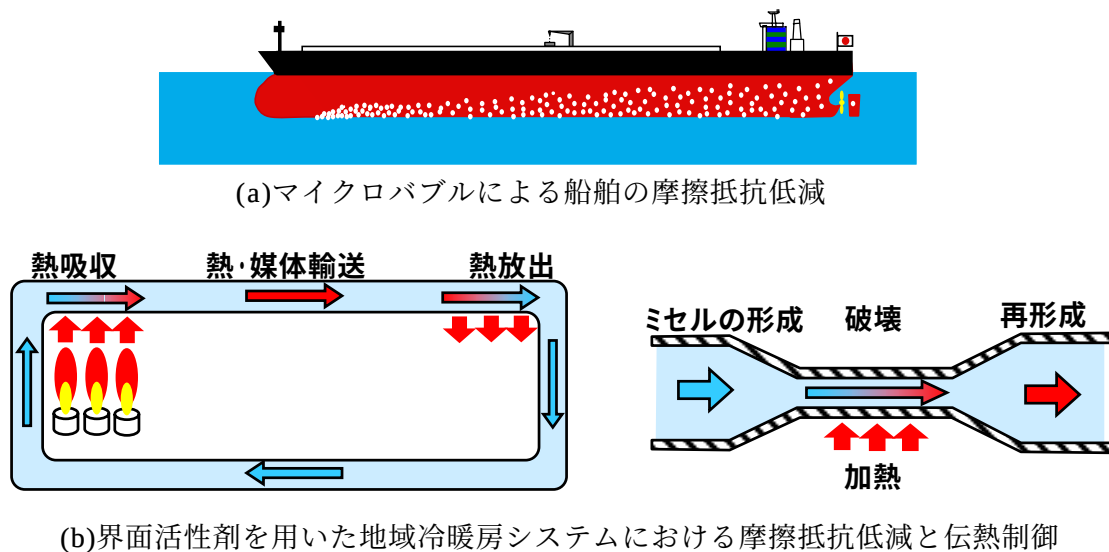


図4 壁乱流制御への物性的アプローチにおける2つの手法

(2) MEMS 的アプローチにおける研究成果の概要

マイクロデバイスを用いた壁乱流ならびに剥離のフィードバック制御システム構築を目指し、制御システム構築の主要構成要素であるセンサ、アクチュエータなどのハードウェアならびに制御アルゴリズムを主とするソフトウェアの研究開発を行った。

先ず、DNS(Direct Numerical Simulation, 直接数値シミュレーション)により、壁乱流にはストリーク構造と呼ばれる準秩序的な縦渦構造があり、それが壁近くの乱流場の挙動を支配する役割を負っていることを明らかにした。そしてストリーク構造を検知するために必要とされるセンサの仕様についてパラメータ調査を行い、開発マップを作成した。この結果を受け、理論解析を行いながら熱的・力学的原理を利用した複数タイプのセンサを開発した。具体的には、局所的壁面せん断応力測定用の大きさ $2\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ の熱膜型センサを MEMS 加工技術により試作し風洞による特性評価を行い熱遮断や周波数応答に関する検討を行い逐次改善を加えた。また、これらのセンサをアレー(配列)化できる見通しを得た。この他、流れの方向を正確に検出する片持ち梁センサならびにアクチュエータによる抵抗低減効果の評価するための光ファイバーセンサなどについてその適用性を確認した。

制御用アクチュエータについても、制御のために要求される性能に基づき、種々の適用可能なアクチュエータ原理について調査し、デバイス開発と同時並行して早期に制御システムを構築するため、直径 1mm のマイクロ電磁アクチュエータと前述熱膜型センサアレーによる制御システムの原型を試作した。アクチュエータについてはその最適仕様を実現するためさらなる努力が必要であるが、この制御システムの原型の試作により、問題点的確な抽出とその対策を講ずることが容易になった³⁾。この他にも、高い周波数領域をもカバーできる積層型 piezo セラミックアクチュエータ、電歪型アクチュエータ、剥離能動制御のマイクロジェットヴォルテックスジェネレータ (MJVG) などについて動作原理の確認し、その成果について特許申請した。

上記デバイスを駆動する制御アルゴリズムについて、DNS を用いて乱流とマイクロセンサ・マイクロアクチュエータ・アレーの働きをシミュレートすることによって、遺伝的アルゴリズムならびにニューラルネットワークなどのアルゴリズムを検討し、センサやアクチュエータの配列仕様、最適制御入力などを予測し上記のシステム構築に逐次

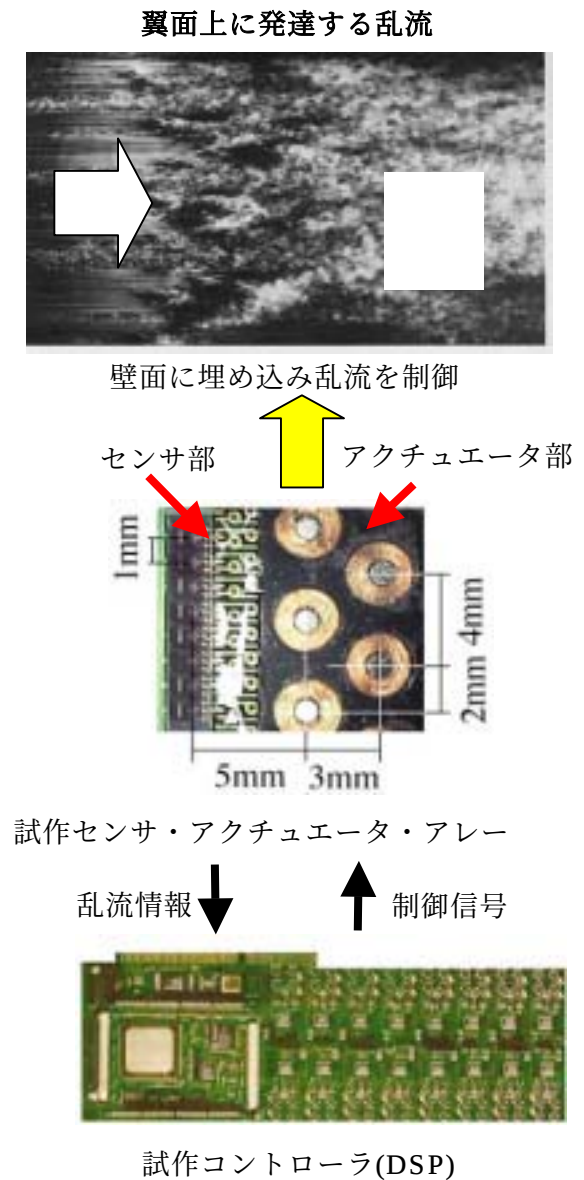


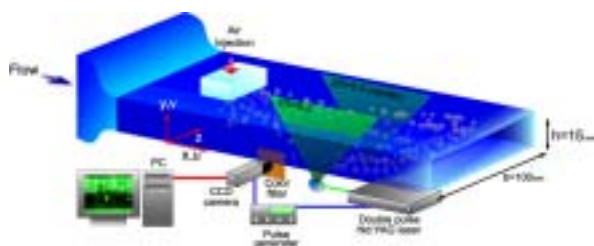
図 5 壁乱流のフィードバック制御のため試作されたセンサ・アクチュエータ・アレーとコントローラ³⁾

反映させた。

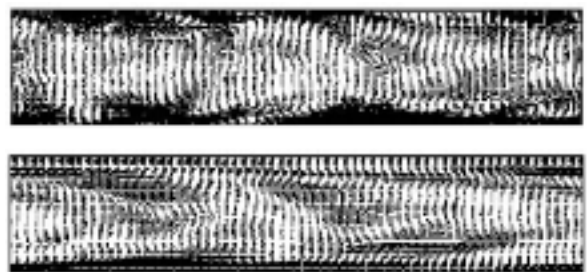
(3) 物性的アプローチにおける研究成果の概要

マイクロバブルを用いた壁乱流の制御法については、レーザ光によって蛍光発光するトレーサを水中に添加した PIV/LIF(Particle Image Velocimetry/Laser-Induced Fluorescence)法を用いて気泡と乱流の干渉を詳細に計測し、乱流による摩擦抵抗増大の主因であるレイノルズ応力の発生を気泡が抑制するメカニズムを世界で初めて明らかにすることができた⁴⁾。また、摩擦抵抗低減効果を最大にする気泡径を調査するため、水ジェット法、流路幅変更法、空気溶解法の3種類の発生気泡径制御法を開発した。空気溶解法では、直径 $20\mu\text{m}$ 程度の極めて微細な気泡を発生させることができ、従来のサイズの気泡に比べて摩擦抵抗低減効果が2倍程度になるという有望な結果が得られた。今後、さらに摩擦抵抗低減効果を高める気泡径を調査し、その実用的な発生法を検討する予定である。

界面活性剤添加による乱流制御技術では、LDV(Laser-Doppler Velocimetry)や PIV による乱流の渦構造の測定によって、抵抗低減に伴う乱流状態の変化が明らかになった。界面活性剤添加溶液の非ニュートンの力学特性(レオロジー特性)を忠実に組み込んだ高精度 DNS によって高いワイゼンベルグ数まで解析を行い、実験と比肩する50%もの抵抗低減を世界で初めて再現することができた⁵⁾。今後、さらに数値シミュレーションと実験を行うことによって、抵抗低減と熱伝達制御を同時に実現する制御手法の開発に進む予定である。



(a)マイクロバブル用 PIV/LIF 計測システム



(b)界面活性剤添加チャンネル流れの DNS

上: 界面活性剤無添加状態、下: 添加状態

図6 物性的アプローチにおける研究成果

5.乱流燃焼制御

(1)研究目標の概要

サブテーマ「能動乱流制御」は壁乱流を研究対象とし、乱流抑制による摩擦抵抗の低減というマイナスの効果を押さえることが中心課題であるが、本サブテーマ「乱流燃焼制御」は噴流乱流場およびそこでの燃焼を対象とし、乱流を利用することによる燃料ガ

スと空気との混合・拡散の促進、それによる燃焼促進というプラスの効果を活用することが中心課題である。そして本サブテーマでは、現在燃焼の分野で中心的な研究課題である、低環境負荷型燃焼技術として注目されながらもその不安定性故に利用範囲が限られている希薄予混合燃焼の安定化と有害排出ガスの低減を目標として研究に取り組んだ。

まず、具体的な制御対象を、実用面で最も重要なメタン希薄予混合ガスタービン用燃焼器に限定し、制御による安定範囲の拡大を目指した。

ターゲットが絞られたとしても、乱流燃焼制御を実現するためには、燃焼、流体、制御等、様々な分野にわたる知見を必要とする。そのため、必要とされる基礎的研究を実施するとともに、近未来に向けた実用・応用技術の開発を目指した研究を実施した。

基礎的研究の研究目標は、現象の解明である。制御実現のために解決しないければならない問題として、火炎の不安定性、構造、保炎・消炎メカニズムの解明があげられる。これらの現象解明は、システムのモデル化をはじめとする制御理論および制御手法等の広範囲な技術の確立に貢献する。従って、これら個別の研究課題を解決することを目標とし、高精度数値解析・光学計測等による燃焼の詳細な現象把握を実施した。

一方、応用を考えた研究においては、現状の燃焼器における問題を把握した上で、実用化に向けたモデル燃焼器を設計するとともに、基礎研究との連関を取りながらアクチュエータ・センサ・コントローラを開発し総合的制御システムとして構成することを目指した。これをふまえて、具体的な燃焼制御用デバイス・制御システムの開発、モデル燃焼器による実証実験等、次世代燃焼器に要求される乱流燃焼制御の基盤技術の研究・開発を実施する。

最終的には、これら新しい乱流燃焼技術開発における諸基盤技術をシステム化することにより、不安定な希薄予混合燃焼の安定範囲の拡大を実現する次世代の燃焼器開発に結びつけることを目標とする。

以上を総合して、本サブテーマでは、噴流乱流における燃焼過程を制御対象とし、その中でも特に低環境負荷型燃焼技術として期待されている希薄予混合燃焼について、高温環境下で利用可能なセンサ・アクチュエータ技術の開発（3年後）、それらのシステム化、吹き消えや燃焼騒音・振動などの不安定現象の抑制による希薄予混合燃焼の適用範囲の拡大、燃焼効率の向上と有害生成ガスの低減（以上5年後）を目指す。

(2)研究成果の概要

平成12年度は国内外の研究進捗状況の把握、制御システムの調査、さらに、燃焼制御のための計測技術の検討、燃焼系の数値シミュレーションによる火炎構造、騒音発生メカニズムの解明等の基礎的研究を行った。この基礎研究・調査研究を踏まえ、平成13年度においては、モデル燃焼器の開発・実験、制御用各要素技術（センサ、アクチュエータ）構築、数値シミュレーションによる現象把握といった一連の研究を実施し希薄

予混合燃焼制御に向けたモデルシステムの構築を開始した。以下、研究成果の概要について、基礎的燃焼研究、制御システム研究及び応用的燃焼研究に分類して述べる。

<基礎的燃焼研究>

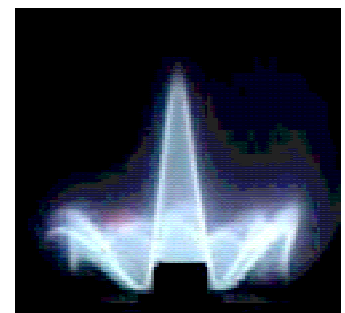
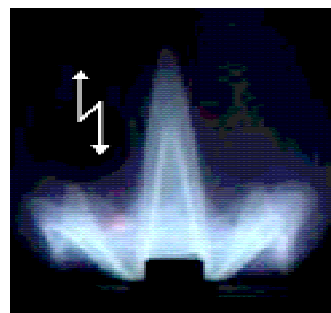
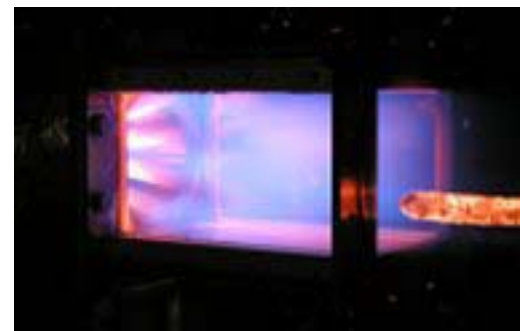
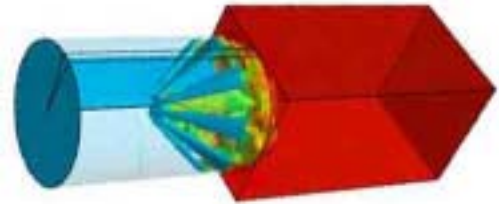
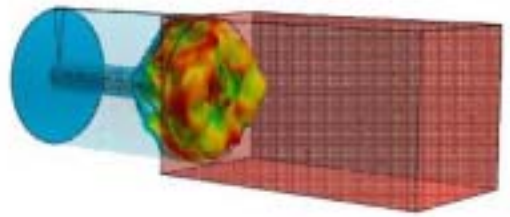
吹き消え、燃焼振動・騒音等、乱流燃焼の不安定現象を抑制するため、実験・シミュレーションによる火炎詳細構造解明、燃焼騒音発生機構に関する基礎知見の拡大を行った。

火炎詳細構造解明に関しては NAL(航技研) 数値風洞を用いた DNS 計算を行い、火炎の詳細構造を理解することにより保炎機構の解明を行った。主として噴流浮き上がり火炎の計算を行うことにより、その火炎構造、保炎メカニズムを解明した。浮き上がり火炎の基部には拡散火炎、過濃予混合火炎、希薄予混合火炎が複雑に絡み合った 3 次元構造が形成され、噴流の中心部には強乱流下にある過濃予混合火炎、その外側には島状の拡散火炎が形成されることがわかった。

燃焼場からの音の発生についても DNS 計算を行い、乱流場と音の発生について、関連を明確にし、音場予測の方程式の評価を行った。

DNS 結果を用いて実用計算用の乱流燃焼モデルの検討も行っている。強乱流下の火炎においては火炎の内部構造にまで乱れの影響が及び、燃料消費と発熱の分布が大きく解離してしまうなど、従来燃焼の LES(Large-Eddy Simulation)に用いられてきた flamelet モデルでは記述できない火炎の存在が明らかになった。今後、DNS データの解析により強乱流場の燃焼にも対応できる LES 用モデルの構築が必要である。

燃焼計測における最先端技術を乱流燃焼制御に対応させる研究を進めた。計測技術は



(c)燃焼振動抑制実験

時間及び空間分解能によってその質が規定されるが、希薄予混合燃焼領域における火炎の保炎と火炎先端の非定常な挙動を高時間分解能で計測する手法として、半導体レーザ分光システム（DLAS）を用い、通常の熱伝対では得ることの出来ない 20kHz での温度サンプリングに成功した。又、PIV による乱流場の流速計測と合わせて乱流燃焼時の火炎振動の検出を試みた。自発光スペクトル計測による火炎面の移動速度と方向を高精度に測定する方法を開発し、乱流火炎での局所の火炎構造の計測が可能であることを示した。これらの時系列非接触詳細計測技術を用いてブラフボディー形状周りの希薄予混合火炎の測定を行った。保炎部における火炎の非定常な振る舞いを時系列に測定して解析し、保炎部における燃焼振動の周波数を特定できた。今後、DNS と連携させることにより保炎消炎現象と局所的な流れ場及び火炎の構造との関係を明らかにしていく。

<制御システム研究>

本格的な制御システム構築に向け、アクチュエータの特性把握、アクチュエータを組み込んだ簡単な制御系試作及びその性能試験を実施した。特に、乱流燃焼騒音・振動抑制のための簡単な手法を提案し、その有効性が確認された。

まずコーン形保炎器、可変スワラ、2次火炎から構成される保炎用デバイスを作成し、保炎性能及び排ガス特性の確認を行い、モデル燃焼器への組み込みを実施した⁶⁾。

次に、乱流燃焼騒音・振動抑制手法として、2次音源を用いた能動騒音制御技術の応用を考えた。音響加振型アクチュエータとして、燃焼制御用スピーカを製作し、スワール型の燃焼器における振動燃焼を抑える実験を行い特定周波数における振動抑制を実現した⁷⁾。さらに、能動制御のための制御アルゴリズムの調査研究を行い、モデル燃焼器に適用する段階へと到達した。マイクロジェット型ピエゾノズルの発生する2次音源の利用も検討した。これは、燃焼場における高温、高圧環境下で利用可能な音源を生成するため、燃料流量変動による発熱変動から音を発生させる方法である。アクチュエータとして高速流量制御機能を有するピエゾ素子を用いた制御弁を用い、燃料流量が脈動する火炎の音響特性、燃焼時・非燃焼時の音圧レベルの周波数特性、燃料ガスの違いが周波数特性に及ぼす影響等を調べ、2次音源として利用可能であることがわかった。

<応用的燃焼研究>

希薄予混合燃焼の超希薄化・安定化を目的とした制御システムの実証に向けた保炎性能を高めた実験用モデル燃焼器の設計開発を行い性能評価の作業を開始した。保炎デバイスを持つモデル燃焼器について、保炎・消炎、振動燃焼等の現象の把握、発生機構の解明に向けて、LIF 及び PIV を用いた詳細な計測を開始した。

同燃焼器を対象に、LES(Large Eddy Simulation)を用い、モデル燃焼器を対象に実験とほぼ同様の条件で計算を行っている。保炎に必要となる再循環領域は、パイロット部、保炎器の外周裾野部に形成され、保炎器アーム部には小さな再循環が形成される事、流速をあげると火炎はさらに下流に形成されやがて保炎器から離れてしまう事等、実験と良い一致が見られる。今後のツールとして LES が利用できる可能性を示している。

6.研究運営

図 8 知的乱流制御研究センター組織図

チューエータの各共通研究要素について、横断的な研究グループが組織されている。

(3)内部評価委員会

内部評価委員会が国際的なメンバー構成 (9 名中 4 名が外国の委員)をもつことも本研究プロジェクトの特徴の 1 つである。メンバー構成については web page を参照されたい。年度の途中では、国内の評価委員だけの会合が数回開かれるが、年度末の会合には全員が出席し、先ずシンポジウムに出席して当該年度の研究成果の説明を受け、評価報告書を作成する。評価指摘事項は、対応するアクションプランに基づき、次年度の研究計画に反映される。外国からの評価委員は非常に熱心且つ率直に評価をされ、評価というものに対する欧米の考え方を感ぜさせた。表 1 に、年度毎の主な評価指摘事項(運営面)とアクションプランを示す。

表 1 年度毎の主な評価指摘事項(運営面)とアクションプラン

年度	評価指摘事項	アクションプラン
H12	産業界との連携を強めよ	産業界の研究メンバーを増やす。 アンケートにより産業界のニーズを調査する。
	研究目標の的を絞れ	各グループとも、目標を明確にし絞り込む。
	サブテーマ間の連携を強化せよ	横断的研究会(計測、数値シミュレーション)を開催する。
H13	各 WG meeting で結論と action item を確認せよ	実施する。
	国研間の連携を促進せよ	合同 meeting の開催、設備や機器の相互利用、共同研究を促進する。

(4)国際シンポジウムの開催

本研究では、毎年 3 月に国際シンポジウムを、H11 年度の先行研究も含めすでに 3 回、開催しており、今後も開催する予定である。シンポジウムでは、本研究プロジェクトの成果の発表だけでなく、乱流制御に関連する世界的に著名な研究者を数名招き講演して頂くとともに議論に参加して頂き、研究へフィードバックしている。シンポジウムの講演ならびに論文集は、国際的研究活動とするため全て英語で行っており、また、来聴できない国内外の研究者のために、Web 上で pdf フォーマットで論文集を公開している。詳細は web page をアクセスされたい。なお、次回のシンポジウムは、2003 年 3 月 3 日、4 日に東京大学で開催予定である。

(5)知的乱流制御研究センターweb page の運営

インターネットは、国際的な情報公開の場として、現在最も有効かつ重要である。そこで、独自ドメイン名 turbulence-control.gr.jp を取得し、

<http://www.turbulence-control.gr.jp/>

にプロジェクトの web page を和文・英文の両方で開設している。ここではプロジェクト紹介の他、シンポジウム開催案内等、ユーザにとって有益と思われる情報をできる限り掲載している。

7.おわりに

本研究プロジェクトでは、研究成果もそれなりに上がり、5 年間の研究期間の半ばがほぼ順調に経過しようとしている。残る 2 年半の期間、最終的な成果の実証に向けて努力を継続する予定である。

本研究は競争的資金による大規模な先端的基礎研究であり、行政対応の研究を中心とする当研究所の研究の中でユニークな位置を占めている。今後、研究成果を上げることが勿論であるが、さらに、本研究の実施によって得られる基礎的研究成果を実用につなげる、得られた先進的技術を他の研究においても活用することなどにより、先端的基礎研究の実施によって得られる成果や研究ポテンシャルが活用されるよう、努力する予定である。

参考文献

- 1) 遠藤誉英、笠木伸英:" Turbulence Control in Low-to-Moderate Reynolds Number Flows", 第 2 回知的乱流制御シンポジウム、2001 年 3 月。
- 2) 笠木伸英:"乱流のアクティブ・フィードバック制御", 日本機械学会論文集 B 編、67 巻 658 号、pp.1298-1304 (2001)。
- 3) 吉野他:"Toward Development of Feedback Control System for Wall Turbulence with MEMS Sensors and Actuators",第 3 回知的乱流制御シンポジウム, 2002 年 3 月。
- 4) 長屋茂樹他:" PIV/LIF Measurement of Wall Turbulence Modification by Microbubbles",第 3 回知的乱流制御シンポジウム, 2002 年 3 月。
- 5) B. Yu 他: "DNS Study on the Drag Reducing Flow with Additives Employing Giesekus Fluid Model and MINMOD Scheme", 第 3 回知的乱流制御シンポジウム、2002 年 3 月。
- 6) 山本武他 : "Combustion Instability in a Swirl Type Combustor", 第 3 回知的乱流制御シンポジウム, 2002 年 3 月。
- 7) 林光一他: "Study on Active Control of Combustion Oscillations for Lean Premixed Combustion Systems",第 3 回知的乱流制御シンポジウム, 2002 年 3 月。