

科学技術振興調整費 開放的融合研究

中間評価報告書

乱流制御による新機能熱流体システムの創出

(実施年度 平成12年度～14年度)

平成14年度

「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」評価委員会

独立行政法人 航空宇宙技術研究所
独立行政法人 産業技術総合研究所
独立行政法人 海上技術安全研究所

目 次

	Page
1. 融合研究評価委員会の構成メンバー(氏名、所属、役職)	4
2. 所用経費一覧	5
3. 課題全体: 研究目標の概要・成果の概要	6
3.1 研究目標の概要	
3.2 研究成果の概要	
4. 課題全体: 研究成果公表等の状況	10
4.1 研究成果発表等	
4.2 特許出願等	
4.3 受賞等	
4.4 主要雑誌への研究成果発表	
4.5 シンポジウム等の開催状況	
5. 課題全体: 開放的融合研究に向けた研究体制の概要	13
5.1 研究総括責任者の指導状況	
5.2 サブテーマ間の連携状況	
5.3 開放的融合研究に向けた取り組み状況	
5.4 融合研究推進委員会の支援状況	
6. 課題全体: 評価結果	16
6.1 進捗状況について	
(1) 目標の達成度について	
(2) 研究全体の進捗状況について	
6.2 目標設定について	
(1) 当初の目標設定が適切であったか否かについて	
(2) 最終目標の変更の必要の有無について	
6.3 研究成果について	
(1) 研究成果の科学的価値について	
(2) 研究成果の波及効果について	
(3) 研究成果の情報発信について	
6.4 研究体制について	
(1) 研究総括責任者の指導性について	
(2) サブテーマ間の連携状況について	
(3) 開放的融合研究に向けた取り組み(積極的な融合が図られているか)	
(4) 融合研究推進委員会の支援	
7. サブテーマ1「能動乱流制御」: 研究目標の概要・成果の概要	19
7.1 研究目標の概要	
7.2 研究成果の概要	

8. サブテーマ1「能動乱流制御」：研究成果公表等の状況	21
8.1 研究成果発表等	
(1)研究発表件数	
(2)原著論文による発表の内訳	
(3)原著論文以外による発表の内訳	
8.2 特許出願等	
8.3 受賞等	
9. サブテーマ1「能動乱流制御」：開放的融合研究に向けた研究体制の概要	23
9.1 サブテーマ責任者の指導状況	
9.2 開放的融合研究に向けた取り組み状況	
10. サブテーマ1「能動乱流制御」：評価結果	24
10.1 進捗状況について	
(1) 目標の達成度について	
(2) 研究全体の進捗状況について	
10.2 目標について	
(1) 目標設定が適切であったか否かについて	
(2) 最終目標の変更の必要の有無について	
10.3 研究成果について	
(1) 研究成果の科学的価値について	
(2) 研究成果の波及効果について	
(3) 研究成果の情報発信について	
10.4 研究体制について	
(1) サブテーマ責任者の指導性について	
(2) 開放的融合研究に向けた取り組み(積極的な融合が図られているか)	
11. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：研究目標の概要・成果の概要	26
11.1 研究目標の概要	
11.2 研究成果の概要	
12. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：研究成果公表等の状況	28
12.1 研究成果発表等	
(1)研究発表件数	
(2)原著論文による発表の内訳	
(3)原著論文以外による発表の内訳	
12.2 特許出願等	
12.3 受賞等	
13. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：開放的融合研究に向けた研究体制の概要	30
13.1 サブテーマ責任者の指導状況	
13.2 開放的融合研究に向けた取り組み状況	

14.1 進捗状況について

- (1) 目標の達成度について
- (2) 研究全体の進捗状況について

14.2 目標について

- (1) 目標設定が適切であったか否かについて
- (2) 最終目標の変更の必要の有無について

14.3 研究成果について

- (1) 研究成果の科学的価値について
- (2) 研究成果の波及効果について
- (3) 研究成果の情報発信について

14.4 研究体制について

- (1) サブテーマ責任者の指導性について
- (2) 開放的融合研究に向けた取り組み(積極的な融合が図られているか)

1. 融合研究評価委員会の構成メンバー (氏名、所属、役職)

委員氏名	所属・役職
* 井上 孝太郎	株式会社 日立製作所 技師長
今井 功	東京大学 名誉教授
竹野 忠夫	名城大学 教授
長洲 秀夫	元日本航空宇宙学会会長
山崎 弘郎	株式会社 横河総合研究所 研究理事、 東京大学 名誉教授
Christopher E. Brennen	米国 カリフォルニア工科大学 教授
Frank W. Schmidt	米国 ペンシルベニア州立大学 名誉教授
Michel Trinite	仏 ルーアン大学 教授
James H. Whitelaw	英国 インペリアルカレッジ 教授

* 委員長

2. 所用経費一覧

1) 研究費の配分一覧（サブテーマ毎）

○研究総括責任者名：大橋秀雄（工学院大学、海上技術安全研究所併任）

（単位：千円）

サブテーマ名	サブテーマリーダー	12年度予算	13年度予算	14年度予算
1. 能動乱流制御の研究	吉田博夫	176,865	179,081	174,402
2. 乱流燃焼制御の研究	小川哲	124,708	118,122	122,739
合 計 額		301,573	297,203	297,141

注)・所用経費一覧表は1枚の用紙にすること。

- ・各年度の合計額＝各サブテーマの配分額の合計。
- ・各サブテーマで共通に使う機器の購入等でサブテーマごとに仕分け困難な場合、どちらかのサブテーマに大まかな数字の記載可。

(2) 年度毎予算額推移（機関毎）

（単位：千円）

年度 機関	12年度予算	13年度予算	14年度予算	合 計
1. 航空宇宙技術研究所	96,279	94,312	93,798	284,389
2. 産業技術総合研究所	83,309	70,312	93,298	246,919
3. 海上技術安全研究所	121,985	132,579	110,045	364,609
合 計	301,573	297,203	297,141	895,917

3. 課題全体：研究目標の概要・成果の概要

課題名（研究総括責任者名（研究機関名））：「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」
（大橋秀雄（工学院大学、海上技術安全研究所併任））

3.1 研究目標の概要

乱流は、非線形現象としての複雑さ・奥深さと工学的有用性故に、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が、それにも拘わらず、ハイゼンベルグの予言「20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」（20世紀初頭）にあるように、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。

しかし最近、レーザ光等を用いた高分解能・非接触光学的流体計測技術、計算機を用いた乱流現象の数値シミュレーション技術、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・アクチュエータ技術、制御理論などの発達などにより、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いつつある。そこで本研究では、これらの最新技術を発展させ、複雑且つ普遍的な流体現象である乱流現象を解明し、そのマイナス面を抑制しプラス面を促進する高度な制御手法の開発に取り組んだ。

乱流制御は、乱流現象の普遍性故に、工学的あるいは理学的にも幅広い波及効果をもたらすが、乱流現象の複雑さ故にタフな課題であり、その実現のためには、基本的な現象理解とともにセンサ・アクチュエータ等の開発における高いハードウェア技術、それを支える多様なソフトウェア技術といった、広範囲にわたる高度な技術開発が要求される。そしてこれらの多岐にわたる技術開発を実現するためには、1企業、あるいは1研究所での実施は実質的に不可能であり、従って本研究では、多数の研究者を集約・組織化した国家的体制を作り、研究を開始した。

制御対象としては、工学分野で現れる2つの主要な乱流形態である壁乱流と自由乱流を選定した。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、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活発な渦運動であり、摩擦抵抗や騒音の発生という短所をもつと同時に、壁・流体間の熱伝達の促進や剥離の抑制という長所をもつ。一方、自由乱流は壁面が存在しない乱流であり、その中でも流体中に噴出されたジェットである噴流乱流は、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。

本研究は、「能動乱流制御」と「乱流燃焼制御」の2つのサブテーマ構成とする。サブテーマ「能動乱流制御」では、壁乱流を制御対象として、負の効果である摩擦抵抗発生抑制、正の効果である壁・流体間の熱伝達の促進や航空機の翼などで発生する剥離抑制を目的とする。制御手段としては、壁面にマイクロセンサ・マイクロアクチュエータ・アレーを埋め込むMEMS技術や、水中に微細な気泡や界面活性剤を少量添加することによる流体物性制御技術を用いて、乱流制御システムのプロトタイプの開発(3年後)、乱流の能動的制御による摩擦抵抗低減・剥離抑制・伝熱制御の実現(5年後)を目指す。サブテーマ「乱流燃焼制御」では、噴流乱流における燃焼過程を制御対象とする。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。

そして、これらのサブテーマにより実現される乱流現象の解明とその制御は、流体に関わる革新的な共通基盤的技術として製造・運輸・エネルギーなど工学の広い分野に波及効果を及ぼすだけでなく、高度非線形現象の制御というサイエンスの新展開、すなわち工学的手法による新たな知の創出に貢献すると期待される。

3.2 研究成果の概要

本研究では、壁乱流と噴流乱流(燃焼)という2つの代表的な乱流を対象として、乱流を制御するための手法を研究し開発している。乱流を制御するためには、ハード及びソフトの双方の技術における飛躍と、それらを融合した成果を必要とする。具体的には、(1)制御すべき乱流の特徴の把握、(2)乱流を検知するためのセンサ技術の開発、(3)乱流を操作するためのアクチュエータ技術の開発、(4)乱流の効率的な制御法の開発、そして最後に、研究成果を統合した(5)実証システムの開発が必要である。ここでは、これら5つの項目について、「能動乱流制御」と「乱流燃焼制御」の2つのサブテーマ研究によって得られた成果の概要を示す。

(1)制御すべき乱流の特徴の把握

乱流制御の実現はまず制御対象としての乱流の特徴の把握が不可欠である。すなわち乱流がどのような構造をもっており、さらにその構造への入力と出力の関係、つまりどのような作用に対してどのような変化が得られるのかといった制御対象の特徴を捉えなくてはならない。

まずDNS (Direct Numerical Simulation、直接数値シミュレーション) を高度化し、壁乱流および乱流燃焼に適用した。DNSとは、流体運動の支配方程式であるナビエーストクス方程式を、離散化以外の近似無しに数値計算することにより実際の乱流現象をコンピュータ上で忠実に再現する高度なシミュレーション手法である。本研究では、これまで困難と考えられていた乱流燃焼場、添加物を含むような乱流場等の複雑な現象についてDNSを実施し、実験だけでは得られない知見を得た。まず壁乱流については、DNSにより、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。また、水流についてDNSを実施し、界面活性剤を微量添加することによって水が非ニュートン流体化され、それに伴って顕著な摩擦抵抗低減が発生するメカニズムを明らかにした。なお、壁乱流に微細気泡を注入したマイクロバブル流れについてもDNSを実施したが、実験で得られている摩擦抵抗低減効果が再現されず、その原因を現在検討中である。乱流燃焼については、乱流燃焼場の詳細なDNSを実施し、希薄予混合燃焼の安定化にとって重要な保炎に関わる現象を見いだした。また、乱流燃焼騒音の詳細なシミュレーションも実施し、騒音発生機構について理解を深めた。今後、DNSの知見に基づき、燃焼器全体のシミュレーション用のモデルの改良、制御システム設計のためのモデリング等に貢献できるようにする。

レーザ光を用いた光学的計測技術も、非接触で流れを高解像度で計測することができ、研究に不可欠なツールである。マイクロバブル流れでは、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。乱流燃焼については、高度なセンサ技術を用いて単純な形状周りの希薄予混合火炎の振る舞いについての測定を行い詳細な時系列データを得た。そしてDNSと比較検討可能な計測データを得ることにより両者を連携させ保炎機構の詳細を解明することが可能となった。

(2)センサ技術の開発

乱流を制御するためには、先ず、複雑に変化する乱流の構造と挙動を正確に知るためのセンサ技術が必要である。壁乱流では、乱流に支配的影響をもつ壁面近くの縦渦構造と運動をとらえるため、マイクロマシン製造技術を利用して、空間的に高い分解能をもち時間的な変化に追従できる複数の壁面センサを開発した。さらに、解析あるいはシミュレーションから得られた設計指針に基づき、これらの応答性等の性能向上を図るとともに、抵抗低減システム構築に向けてアレー化を行った。乱流燃焼では、高温に耐え、且つ非常に高い時間・空間分解能を有するセンサ技術として光学的方法が適しており、そのため半導体レーザ分光システム (DLAS) を開発した。同システムは希薄予混合燃焼領域における火炎先端の

振動を高時間分解能でガス温度計測が可能であり、保炎制御に有効である。これを乱流予混合バーナに応用した。通常の熱電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。これら、高性能なセンサー群からは大量のデータが得られるが、高速にデータ処理を行うソフトウェアの開発も併せて実施した。

今後、実装可能なフィードバック制御システムへの組み込みを念頭に、ロバスト性の向上、最適配列などについて検討する。

(3)アクチュエータ技術の開発

乱流を制御するため次に必要となるものは、乱流を好ましい方向に変化させることができるアクチュエータ技術である。アクチュエータの要件は、少ない労力で大きな変化を発生させることができる高効率性と、好ましい変化のみを発生させそれ以外の変化を発生させない選択的機能性である。

壁乱流については、マイクロマシン技術を用いた、マイクロ電磁アクチュエータ、積層型ピエゾセラミックアクチュエータ、マイクロジェットヴォルテックスジェネレータ (MJVG) の、異なる3つのアクチュエータ技術を検討・開発した。その結果、マイクロ電磁アクチュエータ、積層型ピエゾセラミックアクチュエータは制御には利用可能ではあるものの投入エネルギーが大きい等の問題があることがわかった。また、マイクロジェットヴォルテックスジェネレータは剥離制御には有効であることがわかった。さらに、マイクロバブル技術について、摩擦抵抗低減効果を最大にする気泡径を調べるため、水ジェット法、流路幅変更法、空気溶解法の3つの気泡径制御方法を開発・検討し、空気溶解法による微細気泡により抵抗低減効果が著しく向上することが見いだされた。

乱流燃焼については、不安定になりがちな希薄予混合燃焼を安定保持するために、可変スワラと2次火炎制御により構成される保炎用デバイスを製作した。さらに安定範囲を拡大するため、不安定燃焼の一因である燃焼騒音・振動を抑制する方法として能動騒音制御技術の応用を考えた。そのためのデバイスとして、音響加振型アクチュエータである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。また、2次火炎を変動させることにより音を発生させ、音源として用いることも検討しており、具体的なデバイスとして高速な応答性を有するバルブの利用を考え、その基本特性を把握した。例えば、ピエゾ素子を用いた制御弁を用い、燃料流量が脈動する場合の音響特性、及び燃焼時・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た。

今後、現時点で検討されたアクチュエータの、制御システムへの組み込みに向けたロバスト性の向上、最適配列などについて検討する。また、より高性能なアクチュエータ開発も実施する必要がある。

(4)制御法の検討

制御システムの構築はまず制御対象の特徴の把握から始まる。そのためには入力と出力の関係、すなわちどのような作用に対してどのような変化が得られるのかといった制御対象の特徴を捉えなくてはならない。

壁乱流については、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し、遺伝的アルゴリズム、ニューラルネット等の制御手法によって乱流を制御し、摩擦抵抗を低減できることを明らかにした。

乱流燃焼については、音響加振型アクチュエータを用いた燃焼騒音・振動制御のための制御アルゴリズムの調査研究を行い、具体的にシステムを構築して評価した。また、本格的な制御システム構築に向けた簡単なコントローラ系の試作及びその性能試験を実施した。モデル燃焼器の制御則構築のためには複雑形状周りの数値シミュレーションを行う必要があるが、そのためにはシミュレーションで用いる乱流燃焼モデルが必要である。そのため従来のモデルの妥当性について検討を行い、新たなモデル構築の必要性が明らかとなった。詳細な実験データと DNS の比較により得られた知見はこのモデル構築にも有

用である。

今後、上述した具体的なセンサ・アクチュエータの動作特性を想定しながら、実装可能なコントローラを設計・試作する。

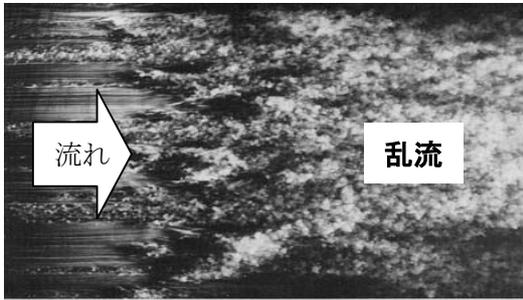
(5)実証システムの検討

能動乱流制御では、壁乱流抵抗低減ならびに剥離抑制のためのフィードバック制御システム構築を最終目標としている。前述の個々の要素デバイス開発と併行して、原型となる制御システムを試作した。

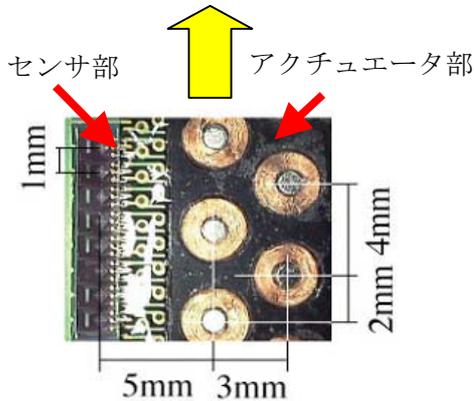
乱流燃焼では、ターゲットをメタン希薄予混合ガスタービン用の燃焼器として、その超希薄化、安定化を実現するシステム構築を最終的な目標としている。今後の制御システム構築のベースとなる保炎性能を高めた実験用モデル燃焼器を設計・製作した。同燃焼器には、保炎用デバイスが組み込まれており、希薄燃焼が可能である。

今後、制御要素デバイスの特性を向上させつつ、それらを最適な形に組み合わせて実証システム構築を行う。

翼面上に発達する乱流



壁面に埋め込み乱流を制御



センサ部

アクチュエータ部

試作センサ・アクチュエータ・アレー

乱流情報 ↓ ↑ 制御信号



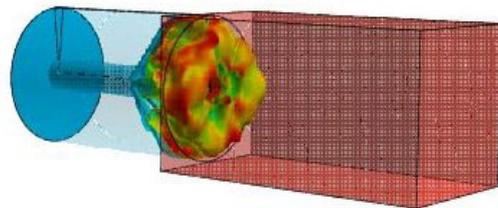
試作コントローラ(DSP)

壁乱流の能動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



モデル燃焼器における燃焼実験

(右側の加熱され光っている棒はガス分析用プローブ)



モデル燃焼器全体の数値シミュレーション結果 (温度分布)

円錐状のものは保炎デバイスの一部

4. 課題全体：研究成果公表等の状況

課題名（研究総括責任者名（研究機関名））：「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」
 （大橋秀雄（工学院大学、海上技術安全研究所併任））

4.1 研究成果発表等

	原著論文による発表	査読つき Proceedings	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	18(4) 件	4(0) 件	7(1) 件	158(8) 件	187(13) 件
国外	28(16) 件	70(4) 件	3(0) 件	24(0) 件	125(20) 件
合計	46(20) 件	74(4) 件	10(1) 件	182(8) 件	312(33) 件

（注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと）

4.2 特許出願等

6 件 （国内 5 件、国外 1 件）

4.3 受賞等

3 件 （国内 3 件、国外 0 件）

4.4 主要雑誌への研究成果発表

Journal	Impact Factor	サブテーマ 1	サブテーマ 2	合計
Journal of Fluid Mechanics	1.912	1	0	1.912
Experiments in Fluids	0.821	2	0	1.642
Int. J. Heat and Fluid Flow	0.968	5	0	4.840
Int. J. Heat and Mass Transfer	0.613	1	0	0.613
J. Computational Physics	1.716	3	1	6.864
Numerical Heat Transfer	1.033	2	0	2.066
Trans. ASME J. Heat Transfer	1.059	1	0	1.059
J. Enhanced Heat Transfer	0.906	1	0	0.906
Computer methods in applied mechanics and engineering	0.913	1	0	0.913
Physics of Fluids	1.799	1	0	1.799
AIAA J.	0.773	0	2	1.546
J. Physics D	1.179	0	1	1.179
Measurement Science Tech.	0.859	0	1	0.859
Combustion and Flame	1.56	0	1	1.56
主要雑誌小計		20.898	6.86	27.758
発表論文合計		21.818	9.285	31.103

4.5 シンポジウム等の開催状況

(1)国際シンポジウムの開催

本課題では、シンポジウムの開催を、

- ①研究成果を公開し広く議論の場を設け、研究へフィードバックする、
- ②乱流制御に関連する世界でも指折りの研究者を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する、
- ③融合研究評価委員が出席し1年間の成果を把握する、

と位置づけ、成果公開の場としてだけでなく、研究に対し広く意見を求める場として活用している。この観点から積極的にシンポジウム開催を行い、先行研究も含めすでに3回を数えた。国際的研究活動とするため、シンポジウムの講演ならびに論文集は全て英語で行った。また、来聴できない国内外の研究者のために、Web上で論文集を公開している。

年次	開催テーマ名	概 要	開催日数	参加人数の累計	
					内外国人
1 1	第1回知的乱流制御シンポジウム 先行研究「新機能流体デバイスによる乱流制御」(H11 単年度)の中で実施。	乱流制御研究を立ち上げるに当たって開催。 能動乱流制御、乱流燃焼制御に関わる分野の第1人者による招待講演及びプロジェクトメンバーによる研究の現状と将来計画についての講演。 招待講演：5件。 プロジェクトメンバーによる講演：4件	2日間	136名	10名
1 2	第2回知的乱流制御シンポジウム	平成12年度に実施した研究から代表的なものについて成果を報告。また、能動乱流制御、乱流燃焼制御に関わる分野の第1人者による招待講演。 招待講演：4件 プロジェクトメンバーによる講演：18件	3日間	158名	25名
1 3	第3回知的乱流制御シンポジウム	平成13年度に実施した研究から代表的なものについて成果を報告。また、能動乱流制御、乱流燃焼制御に関わる分野の第1人者による招待講演。 招待講演：4件 プロジェクトメンバーによる講演15件	3日間	141名	21名

(注：複数開催した場合は、それぞれ分けて記述すること)

(2) 知的乱流制御研究センターweb site 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、

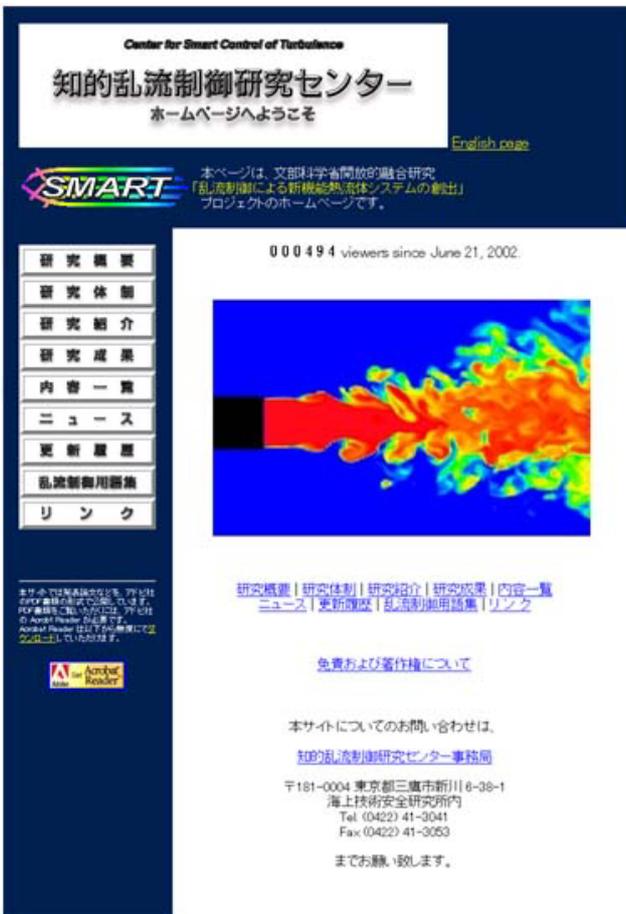
<http://www.turbulence-control.gr.jp/>

にプロジェクトのホームページを和文・英文の両方で開設した。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。特にシンポジウムのページでは講演論文集が PDF でダウンロード可能であり、またプロジェクトの研究報告会における資料（日本語）もダウンロード可能である。

以上、本研究では研究成果の国際的な広報に努めた結果、2000 年から本格的に始まった米国の DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency、米国軍研究本部)によるポリマー・マイクロバブルによる摩擦抵抗低減研究プロジェクト

http://www.darpa.mil/ato/programs/drag_reduct.htm

などに示されるように、乱流制御研究についての関心を世界的に高めている。



(a) 日本語



(b) English

知的乱流制御研究センター Home page

5. 課題全体：開放的融合研究に向けた研究体制の概要

課題名（研究総括責任者名（研究機関名））：「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」
（大橋秀雄（工学院大学、海上技術安全研究所併任））

5.1 研究総括責任者の指導状況

(1) 知的乱流制御研究センターの設置

本研究は、「能動乱流制御」と「乱流燃焼制御」という相互に関連を有しつつも性格の異なる2つのサブテーマの実現に向けて、我が国の流体力学分野の主要な研究者を結集するため、他のすべての開放融合プロジェクトが2つの研究機関で構成されているの対して、航空宇宙技術研究所、産業技術総合研究所、海上技術安全研究所の3つの機械系の独立行政法人研究所、さらに国内主要大学が参加する、大規模なプロジェクト構成となっている。そこで、研究総括責任者がこのような大規模プロジェクトを効率的に指導できるようにするため、幹事研究所である海上技術安全研究所内に「知的乱流制御研究センター」を設置し、上記の3独立行政法人、大学、民間からの本研究参加者はすべて同センター員とすることにより、組織的な指導体制を構成した。

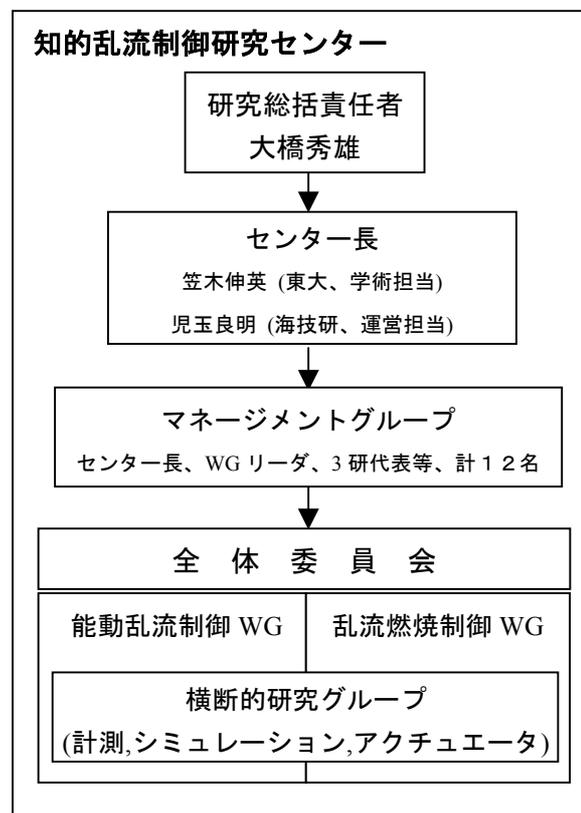
(2) センターの組織構成

まず、研究総括責任者の指示のもとセンター業務を担当する代表者としてセンター長を2名任命した。2名は学術担当（笠木伸英、東京大学）と運営担当（児玉良明、海技研）であり、それぞれセンターの研究面と運営面それぞれの業務を分担した。

次に、研究全体のマネジメントについて検討を行う組織として、開放融合研究マネジメントグループを設けた。このグループは各サブテーマごとの研究ワーキンググループ（WG）のリーダー、3研究所の代表者、両センター長、大学・民間の代表的メンバーといった研究実施の実務者の代表からなり、研究全体の方向性、実行時の予算の有効配分等について組織の枠を越え議論・決定した。研究マネジメントグループの会合は定期的開催され、総括責任者の指示のもと、新年度の研究計画の策定・年度末の研究報告書の作成などに対応した。また、その議事内容、決定事項は逐次マネジメントグループから総括責任者に対し報告され、承認を得るようにした。

さらに、研究総括責任者が研究参加者全員の意見を直接把握し、研究遂行に反映させるため研究参加者全員が参加する全体委員会を、年度初めの研究計画書承認、年度途中の進捗状況報告、年度末の成果報告書承認の年3回開催した。同委員会は研究参加者の意思統一の機会としても有益である。

一方、研究サブテーマ毎にWGを組織し、WGリーダーの指導の下に実際の研究を行った。WG単位のミーティングが毎月1回程度定期的開催され、その進捗状況がマネジメントグループ、さらに研究総括責任者に報告された。さらに、サブテーマWG間の連携を促進するため、計測、シミュレーション、アクチュ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を組織した。



5.2 サブテーマ間の連携状況

研究は、基本的には2つの研究サブテーマWGにおいて行われたが、それらの研究状況はマネジメントグループにおいて統一的に討議され、各WGにフィードバックされた。また、研究参加者全員が出席する全体委員会においても、サブテーマ間の交流が図られた。

さらに、より直接的にサブテーマ間の連携をはかる機会として、横断的研究グループが設けられた。具体的には、計測及び数値シミュレーションのグループが活動を行い、グループミーティングを開催しサブテーマの枠にとらわれない熱心な議論が行われ、シミュレーション手法の向上、計測手法の見直し等の成果があった。これら二つのグループの活動を維持するとともに、さらにアクチュエータに関する新たな横断グループを組織し活動を開始した。

5.3 開放的融合研究に向けた取り組み状況

既述のように、「知的乱流制御研究センター」を海上技術安全研究所内に設置した。3独立行政法人・大学・民間からの融合研究参加者はすべて同センターに所属し、同センターは、所属機関、担当研究分野の垣根を越えた組織として、研究の中心と位置づけられている。

本研究の予算配分と研究計画は、形式的には3研究所のそれぞれにおいて行われるが、実質的には、同センターにおいて、研究総括責任者の下、マネジメントグループが1元的に管理した。

同センターは、1年間の先行研究の期間も含めて、これまで3回の「知的乱流制御シンポジウム」を主催した。同シンポジウムは東京大学で開催され、3研究所の研究者を中心とする本研究プロジェクトの参加者だけでなく、多数の国内外の研究者が参加し、研究成果の広報に役立った。

同センターは、日本語、英語両方のWeb pageを運営し、研究内容の周知、シンポジウムの開催案内、主要な研究報告のダウンロードサービスを、国内だけでなく広く世界中から受けられるようにしている。

また、e-mail（メーリングリストなどを活用）などを通し複数の組織に所属する多数の研究者が随時連絡を取り合い、情報を共有するとともに、実際に各研究サイトへ相互に出向いて実験ならびに数値計算を行っている。そのために、上記乱流制御研究センターへの併任のみならず、必要に応じて各研究機関間で相互に併任をかけ合っている。成果の取りまとめに関しても共同作業が進められている。

また併任といった人的手続きのみならず、参加組織間で共同研究契約を締結することで、相互の備品の貸借、知的所有権の所属等について問題が生じない体制を整えている。

さらに、産業界との連携も積極的に行い、産業界メンバーのサブグループ研究会への参加や複数の企業へのアンケート調査を通して情報交流を行った。それにより、研究ニーズの一層の明確化とそれに伴う研究内容の集中等がなされ、産・学・官が好ましい形で融合した体制となっている。

融合研究評価委員会への対応も同センターの業務としてなされた。各年度における主な評価委員会活動を下表に示す。

各年度における評価委員会活動

名称	時期	参加委員	内容
第1回評価委	6月頃	国内	当該年度研究計画の把握と、前年度評価に対するアクションプランの承認（第1回全体委併催）
第2回評価委	10月頃	国内	当該年度研究進捗状況の把握（第2回全体委併催）
第3回評価委	1月頃	国内	当該年度研究成果の把握（第3回全体委併催）
第4回評価委	3月初旬	全員	1日目：当該年度運営活動報告ヒアリング。 2,3日目：シンポに出席し、当該年度研究活動報告を受ける。 4日目：質疑応答、当該年度評価報告書審議。
評価報告書作成、提出	3月中～下旬	全員	電子メール等により集計した各委員の評価を委員長が取りまとめ、評価報告書を作成し、融合研究推進委員会に提出。

評価委員は、先ず年度初めに第1回評価委員会を開催し、前年度評価報告書において指摘された事項に対応するため研究メンバーによって作成されたアクションプランを承認する。次に、2度の評価委員会により研究の進捗状況と成果を把握する。そして年度末に、4名の外国委員を含む9名全員の出席の下に、国際シンポジウムにおいて当該年度の最終成果内容を把握すると共に、第4回評価委員会において当該年度の研究成果を評価する。その結果は電子メール等により集計され、当該年度評価報告書が作成され、研究成果報告書と共に開放融合研究推進委員会に提出され、承認される。なお、アクションプランへの対応実績は年度末の評価委員会における評価対象とされる。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下表に示す。

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。

このように、評価委員会による評価結果は具体的且つ詳細であり、研究計画に着実に反映され、研究の方向付けと進展に寄与した。

5.4 融合研究推進委員会の支援状況

融合研究推進委員会は、融合研究参加3研究機関それぞれの研究担当理事、管理部長、企画室長に相当するメンバー、合計9名から構成された。また、より臨機応変に開催できる組織として、3研究機関の企画室長によって融合研究推進委員会幹事会が作られた。

同委員会が各年度末に開催され、当該年度の研究成果報告書と研究評価報告書を承認した。また、必要に応じて随時推進委員会を開催するのはメンバー構成から考え困難であることから、3研究所の企画室長に相当するメンバーから構成される融合研究推進委員会幹事会が、適宜事務的事項の検討に当たった。

過去、研究総括責任者から「研究実施に際し各研究所間の違いをできる限り吸収できるような体制が望ましい」との意向を受け、推進委員会により対応が図られた。具体的には、各研究所間での人事・予算上の取り扱いについて研究の自由度が高まる方向で平滑化が行われ、それに沿う形で、大学等との共同研究契約も一元化され、事務作業の軽減につながった。さらに、非常勤職員(ポスドク)の待遇も3研究所間で統一された。

また、本研究の中心に位置づけられる知的乱流制御研究センターの設置と同センターの業務に欠かせない全ての研究参加者のセンターへの併任発令といった作業が推進委員会のサポートにより実現した。

6. 課題全体：評価結果

課題名（研究総括責任者名（研究機関名））：「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」
（大橋秀雄（工学院大学、海上技術安全研究所併任））

6.1 進捗状況について

(1) 目標の達成度について

本中間評価までのプロジェクト前期では、2つのサブテーマのいずれにおいても、制御すべき乱流の特徴の把握に始まり、乱流制御を実現するための基盤的な技術（センサ、アクチュエータ、制御手法）の確立と、それを支えるための高度な計測法、高精度なシミュレーション技術をはじめとするソフトウェア技術の開発が目標とされている。

サブテーマ「能動乱流制御」については、本中間評価までの目標として、さらに乱流制御システムのプロトタイプの開発が挙げられている。壁乱流の特徴の把握については、制御対象としてのストリーク構造が同定され、制御のためのセンサとして MEMS 技術を用いたアレーが試作され、順調な進捗を見せている。一方、アクチュエータについては、センサと同じく MEMS 技術を用いていくつかの試作が行われているが、その応答性など、まだ改善の余地がある。しかし、所期の目標通り、センサ・アクチュエータ・アレーとコントローラを組み合わせた乱流制御システムのプロトタイプが製作されたこと、MEMS による制御について制御アルゴリズムに踏み込んだ検討がなされていることは大いに評価できる。添加物による流体の物性変化を利用した壁乱流制御法の研究では、DNS や光学的計測法を用いた摩擦抵抗低減メカニズムの解明が進展した点は評価できる。マイクロバブルについて気泡径制御の試みは、現時点ではまとまった成果に至っていないが、世界でも類の無いものであり、今後さらに精度を上げた研究を進めるべきである。

サブテーマ「乱流燃焼制御」については、プロトタイプ開発が中間評価までの目標に含まれていないことに見られるように、能動乱流制御に比べて進展度がやや劣る。これは、能動乱流制御が平成 11 年度の先行研究から実質的な研究が開始されたのに対して、乱流燃焼制御は平成 12 年度から研究が開始されたという事情も影響している。平成 12 年度の評価では、研究体制づくりが遅れている、研究目標が十分に絞り込まれていないなどの指摘があり、これを受けて平成 13 年度には、燃料をメタンに絞るなど、研究体制と研究目標についてかなりの改善が見られた。そして本中間評価の段階では、メタン希薄予混合ガスタービン想定してモデル燃焼器が製作されたこと、2 次火炎による火炎の安定化という成果が得られたことなど、その成果が現れ始めている。希薄予混合燃焼という大きな波及効果をもつ技術を実用化するためには、本研究プロジェクトで取り組まれているような基盤技術を固めることが重要である。従って、今後、最終目標に到達するよう、一層の研究努力をすべきである。

以上を考慮して、両サブテーマを総合した全体の目標達成度は 85% と考える。

(2) 研究全体の進捗状況について

サブテーマ「乱流燃焼制御」においてモデル燃焼器の製作がやや遅れたが、全体として、研究は順調に進捗している。

6.2 目標設定について

(1) 当初の目標設定が適切であったか否かについて

個々の基盤技術を確立し制御システムを構成するという当初の目標設定は、十分ハードルが高く且つ有意義であり、適切であった。

(2) 最終目標の変更の必要の有無について

最終目標である「乱流制御システムの実現」に向けて、個々の基盤技術がほぼ整ってきた。今後、こ

れらを高度化しつつ統合することによりシステム構築の実現が十分期待できる。従って、最終目標の変更は必要ない。

6.3 研究成果について

(1) 研究成果の科学的価値について

本研究プロジェクトが最終的に目指す、乱流という高度に非線形な現象の制御という、工学的手法によるサイエンスの新展開にはまだ間があるが、その準備段階としての要素技術の開発に、いくつか見るべき点がある。

能動乱流制御について、MEMS 技術を用いて試作されたセンサ・アクチュエータ・アレーおよびコントローラは、MEMS 技術の発展に新しい方向性を与えると期待される。

流体運動の数値シミュレーション手法である DNS は、計算機の継続的な発達により、知の手段として今後益々重要になると予想される。本研究では、複雑な流体现象である乱流について、さらに制御法・気泡流・燃焼などの複雑さを加えた状態で、それぞれについて高度な DNS 手法が開発されつつあり、科学的価値の点で評価できる。ただし、いずれについても、研究の後半期において、完成度を高める努力が求められる。

乱流の光学的計測法について、いくつかの新しい手法の開発があり、重要な進展があった。

(2) 研究成果の波及効果について

最終成果として予想されている乱流制御を現時点で評価することはできないので、ここでは、個々の要素技術について既に得られた成果の波及効果を評価する。

工学の分野に属する本研究の波及効果は、主として実用化、すなわち産業界への貢献と考えられる。MEMS 技術によって開発された壁面剪断力センサは世界でも最新の技術を用いて作られているので、それ自体で利用価値がある。気泡流について新しく開発された PIV/LIF 計測法は、混相流の計測法として普及していくと期待される。微細気泡の発生法は、直接的には船舶の摩擦抵抗低減デバイスであるマイクロバブルの高効率化に寄与するが、さらに、環境浄化、洗浄、化学反応促進といった製造に関わる分野での利用が期待できる。燃焼計測で用いられている半導体レーザーによる計測技術は、高温場の製造過程のモニタリングに利用できるだろう。一般的に、本研究で開発された計測技術・シミュレーション技術は、非常に基礎的な技術であるだけに応用分野も広く、本来の目的である乱流制御に近い流体機械の設計だけでなく、製造現場・医療・マイクロラボといったより広い領域で活用できる可能性があり、その方面への努力をするべきである。

(3) 研究成果の情報発信について

能動乱流制御、乱流燃焼制御のいずれのサブグループにおいても、多数の学術論文や学会発表を通じて広く成果を発信している。さらに、毎年開催されている国際シンポジウム、和英文両方によるホームページの開設など、十分な情報発信がなされている。さらに、国際的な乱流制御研究の機運を高めている点も評価する。

6.4 研究体制について

(1) 研究総括責任者の指導性について

本研究プロジェクトに参加する 3 つの独立行政法人研究所、国内主要大学を組織化するため知的乱流制御研究センターを設置し、組織的な指導体制を構成したことは高く評価できる。また、研究開始時において「研究実施に際し各研究所間の違いをできる限り吸収できるような体制が望ましい」との要望を 3 研究所に対して出し、管轄省庁の違いによる様々な実務的障害の除去に努めたことは、研究プロジェクトの円滑な運営に大きく寄与した。

(2) サブテーマ間の連携状況について

2つのサブテーマでは、対象とする流れが大きく異なるため、連携は容易でなく、継続的な努力が必要とされる。その中で、

シンポジウム、全体委員会、マネジメントグループなどを通じた情報・意見交換、

数値シミュレーション、計測法、アクチュエータなどの共通技術に関する横断的研究会の開催、などの努力は評価できる。今後、連携をさらに深めて、能動乱流制御グループで先行している研究、例えば制御アルゴリズムの検討結果を乱流燃焼制御グループで具体的に活用する、といった事例が生まれることが望まれる。

(3) 開放的融合研究に向けた取り組み（積極的な融合が図られているか）

「知的乱流制御研究センター」を設置し、組織的な指導体制としたことは高く評価できる。研究の後半期には、最終成果に効率的に到達するため、両研究グループにおける研究の方向付けがさらに強く求められる。センター組織を活用し、その実施に努めるべきである。

3研究所に分配される本研究の予算をセンターにおいて一元管理したことは、本研究制度の趣旨に適っている。

融合研究評価委員会への対応は、年度毎の評価報告書をアクションプランとして次年度計画へ反映させるなど、十分に満足がいくものであった。評価委員会から指摘された「産業界との連携の強化」に対して産業界からの研究メンバーを補強したことなどが、その一例である。

(4) 融合研究推進委員会の支援

研究総括責任者からの「研究実施に際し各研究所間の違いをできる限り吸収できるような体制が望ましい」という意向を受け、推進委員会により対応が図られ、研究実施に関わる事項について大きな改善が見られた。十分な支援が行われたと考えられる。なお、3研究所が独立行政法人化されたことにより、増えたと期待される研究所としての自由度を、本研究プロジェクトの運営面で生かす工夫が望まれる。

7. サブテーマ1「能動乱流制御」：研究目標の概要・成果の概要

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：能動乱流制御の研究（吉田博夫（産業技術総合研究所））

7.1 研究目標の概要

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、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活発な渦運動である。壁乱流は、摩擦抵抗を非乱流状態(層流とよぶ)に比べて100倍程度増大させるという大きな短所や、騒音の発生という短所、壁・流体間の熱伝達の促進や剥離の抑制という長所などをもち、特に輸送機器にとって重要な乱流である。本サブテーマ研究では、壁乱流を制御対象として、負の効果である摩擦抵抗発生の抑制、正の効果である壁・流体間の熱伝達の促進や航空機の翼などで発生する剥離の抑制を目的とした。

乱流の制御方法は、あらかじめ作られたデバイスの流れに設置するだけの受動的方法と、流れの状態に応じて乱流の微細渦構造に直接働きかける能動的方法に大別される。能動的乱流制御方法は、流れの状況変化に追従してミクロ的に制御が行える点で受動的方法より格段に優れており Impact の大きな技術である。しかし、乱流という微細渦構造に対する能動制御を実現するためには、それらと同じ大きさ(mm $\sim\mu$ m)のセンサ・アクチュエータデバイス群の開発や、デバイスを有機的に結合し複雑な流れの変化に追従し適切に制御するための制御アルゴリズムを開発する必要がある、1980年代に主に米国において研究開発が開始されたが、基礎研究レベルのまま今日に至っている。

一方、近年超高速計算機の発達によって乱流の高精度直接シミュレーションが実施されたこと、気泡や界面活性剤などを流体中に少量添加することにより流体の物性が変化し乱流特性が劇的に変化することが分かってきたこと、新しい3次元流体計測手法が開発されたこと、さらにマイクロマシン技術の長足の進歩によりミクロンオーダーの制御デバイスの設計・製作能力が格段に進歩してきたことなどにより、乱流のメカニズムの解明と制御デバイスの研究が進み、乱流制御の開発基盤が急速に固まりつつある。本課題に参画する3研究所では、これまでこの開発基盤を確かなものとするための研究を積極的に実施し、能動制御システム構築に着手するための準備を進めてきた。

本サブテーマでは、壁乱流を制御対象として、負の効果である摩擦抵抗や流れの剥離の抑制、正の効果である壁・流体間の熱伝達の促進を目的とする。制御手段としては、壁面にマイクロセンサ・マイクロアクチュエータ・アレーを埋め込むMEMS技術やそれらの制御アルゴリズム(ソフトウェア)技術、水中に微細な気泡(マイクロバブル)や界面活性剤を少量添加することによる流体物性制御技術を用いて、乱流制御システムのプロトタイプの開発(3年後)、乱流の能動的制御による摩擦抵抗低減・剥離抑制・伝熱制御の実現(5年後)を目指す。

7.2 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。また物性利用による乱流制御技術では、マイクロバブルと界面活性剤について、摩擦抵抗低減メカニズムの解明と制御法の要素研究を行った。

壁乱流ならびに剥離のフィードバック制御能動制御の研究においては、まず、DNS(3.2参照)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2mm \times 1.7mm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

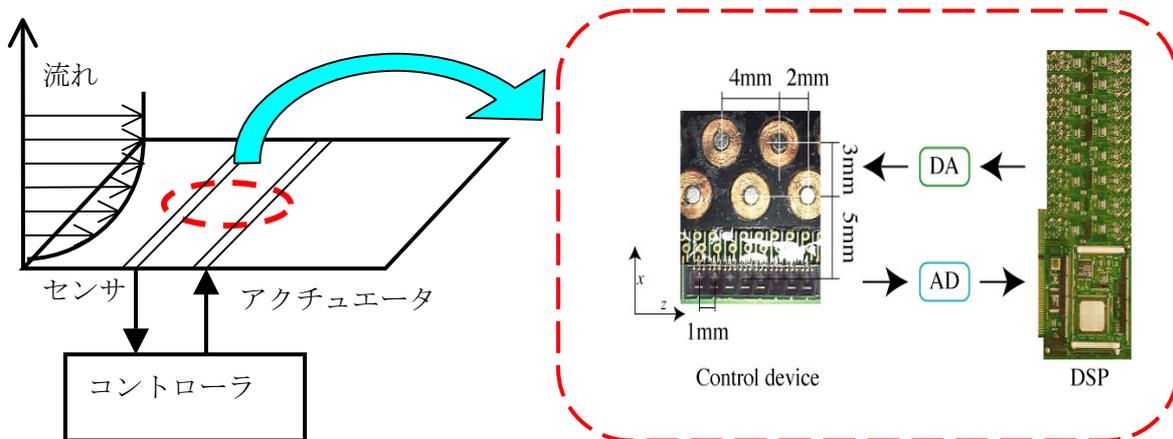
い熱遮断や周波数応答に関する検討を行い逐次改善を加えた。また、これらのセンサをアレー(配列)化できる見通しを得た。この他、流れの方向を正確に検出する片持ち梁センサならびにアクチュエータによる抵抗低減効果を評価するための光ファイバーセンサなどについてその適用性を確認した。

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、問題点の的確な抽出とその対策を講ずることが容易になった。この他にも、高い周波数領域をもカバーできる積層型ピエゾ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反映させた。

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 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。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によって高いワイセ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。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。



熱膜型センサ群・マイクロ電磁アクチュエータ群から構成される制御システムのプロトタイプ

8. サブテーマ1「能動乱流制御」：研究成果公表等の状況

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：能動乱流制御の研究（吉田博夫（産業技術総合研究所））

8.1 研究成果発表等

（1）研究発表件数

	原著論文による発表	査読つき Proceedings	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	7(4) 件	0(0) 件	5(1) 件	52(8) 件	64(13) 件
国外	6(11) 件	38(4) 件	0(0) 件	7(0) 件	51(15) 件
合計	13(15) 件	38(4) 件	5(1) 件	59(8) 件	115(28) 件

（注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと）

（2）原著論文による発表の内訳

1) 国内 [発表題名、発表者名、発表誌名等（雑誌名、巻、号、頁、年 等）]

1. “乱流のアクティブ・フィードバック制御”、笠木、日本機械学会論文集 B 編、67 巻 658 号、pp.1298-1304 (2001).
2. “界面活性剤添加による抵抗低減流れにおける温度境界層の構造と熱伝達特性”、川口、台坂、矢部、菱田、前田、日本機械学会論文集 B 編、67 巻 658 号、pp.15-22 (2001).
3. “せん断流中の単一気泡の挙動”、藤原、菱田、日本機械学会論文集 B 編 68 巻 667 号、pp.696-703 (2001).
4. “マイクロバブルによる船舶の摩擦抵抗低減”、児玉、日本流体力学会誌「ながれ」20 巻 4 号、pp. 278-284 (2001).

（他計 1 1 件）

2) 国外 [発表題名、発表者名、発表誌名等（雑誌名、巻、号、頁、年 等）]

1. “Active control of streak structures in wall turbulence using an actuator array producing inclined wavy disturbances”, Segawa, T., Kawaguchi, Y., Kikushima, Y., and Yoshida, H., *Journal of Turbulence*, Vol.3 015 (2002).
2. “Active Control of Wall Turbulence with Wall Deformation,” Endo, T., and Kasagi, N., *JSME Int. J.*, Vol. 44, No.2, pp. 195-203 (2001).
3. “Heat transfer enhancement to the drag-reducing flow of surfactant solution in two-dimensional channel with mesh-screen inserts at the inlet”, Li P.W., Kawaguchi, Y., Daisaka, H., Yabe, A., Hishida, K. and Maeda, M., *ASME Journal of Heat Transfer*, **123**, pp.779 – 789 (2001).
4. “Reynolds number effect on wall turbulence: Toward effective feedback control”, Iwamoto, K., Suzuki, Y., and Kasagi, N., *Int. J. Heat & Fluid Flow*, (to appear).

（他計 1 7 件）

(3) 原著論文以外による発表の内訳

1) 国内 [発表題名、発表者名、発表誌名等(雑誌名、巻、号、頁、年等)]

1. “乱流の制御”、笠木、鈴木、深淵、パリティ、15巻 (2002年11月発行予定)。
2. “壁乱流の知的能動制御”、鈴木、笠木、セーブメーション・レビュー「マイクロフローセンサ特集号」、(株)山武技報、pp. 50-57 (2001)。
3. “乱流のスマート・コントロールに向けて”、笠木、日本航空宇宙学会誌、48巻554号、pp. 155-161 (2000)。

(他計6件)

2) 国外 [発表題名、発表者名、発表誌名等(雑誌名、巻、号、頁、年等)]

(計0件)

(4) 査読付き Proceedings

1) 国内 [発表題名、発表者名、発表誌名等(雑誌名、巻、号、頁、年等)]

0件

2) 国外 [発表題名、発表者名、発表誌名等(雑誌名、巻、号、頁、年等)]

1. "Effect of Nonlinear Interaction on Feedback Control of Wall Turbulence", Iwamoto, K., Suzuki, Y., and Kasagi, N., Proc. 2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, June, 2001, Stockholm, Vol. 3, (2001), pp. 17-22.
2. "Assessment of the Wall Shear Stress Measurement with Arrayed Micro Hot-film Sensors in a Turbulent Channel Flow", Yoshino, T., Suzuki, Y., Kasagi, N., and Kamiunten, S., Proc. 2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, June, 2001, Stockholm, Vol. 2, (2001), pp. 153-158.
3. "An active control of wall turbulence by actuator array producing spanwise perturbations", Segawa, T., Kawaguchi, Y., Kikushima, Y., and Yoshida, H., Proceedings of 2nd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Vol. 1, pp. 187-192 (2001).

(他計42件)

8.2 特許出願等

1) 国内 (4件)

“加振型トルク制御装置”、瀬川、菊島、吉田、特願2000-181182、2000年6月16日。

“縦渦発生装置”、阿部、特願2001-058702、2001年3月2日。

“船舶の摩擦低減装置”、檜垣、川北、石川、高野、高橋、特願2001-358659、2001年11月26日。

“船体抵抗低減船”、児玉、特願2001-379550、2001年12月13日。

2) 国外 (1件)

“Heat Exchanger Using Drag Reducing Fluid”、Kawaguchi, Y., Yabe, A., U.S. Patent 6,112,806, Sep.5, 2000.

8.3 受賞等

1) 国内 (2件)

“噴流制御のためのミニチュア・アクチュエータ群を備えたインテリジェントノズル・システムの構築の研究”、鈴木宏明、2000年度日本機械学会奨励賞。

“フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ群による軸対称噴流の能動制御”、笠木伸英、鈴木雄二、2002年度伝熱学会学術賞。

2) 国外 (0件)

9. サブテーマ1「能動乱流制御」：開放的融合研究に向けた研究体制の概要

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：能動乱流制御の研究（吉田博夫（産業技術総合研究所））

9.1 サブテーマ責任者の指導状況

異なる省庁（当時の運輸省、科技庁、通産省）に属する3つの研究所（当時の船舶研、航技研、機械研）ならびに複数の大学との連携は文化的背景の差から通常極めて困難であるが、本プロジェクトが採択される約5年位前から3研究所の所長レベルで定期的に懇談会がもたれてきた。ついで、核となる研究メンバーがお互いの研究施設を見学し、ミーティングを定期的に継続してきており意志疎通の基盤は十分培われてきた。プロジェクト採択後も研究連絡会を随時開いて研究進捗のチェックを行った。また、参加民間企業メンバーの意見や民間企業へのアンケート結果を参考に研究開発課題の見直しをしつつ、それぞれの研究ポテンシャルを十分に生かせるような研究課題分担を行った。優先すべき課題を絞りセンサ、アクチュエータなどの制御デバイス開発に重点的に予算配分をした。特にアクチュエータに関しては克服すべき点が多く、メンバーで手分けして開発仕様マップを作成し研究環境を整えた。また、随時参加メンバーの見直しを行い有為な人材の確保に努めた。ポストドク研究員も国内外あわせてこれまで7名を雇用し研究者育成を行った。

統括責任者ならびにセンター長の指示の下、現場研究者の状況を的確に捉えながら研究を支えている。

9.2 開放的融合研究に向けた取り組み状況

年3回の定例会議に加え適宜研究ミーティングを開催し研究方向に対する共通理解を維持する努力を行っている。各会合では研究進捗のチェックを行っている。

本プロジェクトの成果はweb上、シンポジウム、ならびに学会の特別セッションの場で広く社会に公表している。研究推進に当たっては、民間企業研究者の参加を仰ぐとともに意見収集を行っている。また、共同研究契約締結のもと、測定機器の共同有効利用、各研究所固有の試験装置の共同使用を積極的に実施している。研究成果を異なる研究所所属研究者の共著で学会発表をした。

予算に関しては、概算要求の前に参加メンバーとの打ち合わせを密に行い、各活動グループの当該年度予算の割り当てを決めた。また、年度の途中でも関連研究に関する最新情報収集派遣など、緊急に手当が必要な件について3研究所で協議し迅速な処置を行った。

10. サブテーマ1「能動乱流制御」：評価結果

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：能動乱流制御の研究（吉田博夫（産業技術総合研究所））

10.1 進捗状況について

(1) 目標の達成度について

本中間評価までのプロジェクト前期では、制御すべき乱流の特徴の把握に始まり、乱流制御を実現するための基盤的な技術（センサ、アクチュエータ、制御手法）の確立と、それを支えるための高度な計測法、高精度なシミュレーション技術をはじめとするソフトウェア技術の開発、さらに乱流制御システムのプロトタイプの開発が目標とされている。

壁乱流の特徴の把握については、制御対象としてのストリーク構造が同定され、制御のためのセンサとして MEMS 技術を用いたアレーが試作され、順調な進捗を見せている。一方、アクチュエータについては、センサと同じく MEMS 技術を用いていくつかの試作が行われているが、その応答性など、まだ改善の余地が大きく今後の飛躍に期待したい。しかし、所期の目標通り、センサ・アクチュエータ・アレーとコントローラを組み合わせた乱流制御システムのプロトタイプが製作されたこと、MEMS による制御について制御アルゴリズムに踏み込んだ検討がなされていることは大いに評価できる。添加物による流体の物性変化を利用した壁乱流制御法の研究では、DNS や光学的計測法を用いた摩擦抵抗低減メカニズムの解明が進展した点は評価できる。一方、マイクロバブルによる抵抗低減効果が DNS により十分再現されたとは言えず今後一層の進展が望まれる。また、マイクロバブルについて気泡径制御の試みは、現在はまとまった成果に至っていないが、世界でも類が無く、今後さらに精度を上げた研究を進めるべきである。

また、計測技術、シミュレーション技術の向上についてもめざましいものがあり、現象の理解、センサ、アクチュエータの仕様の確定、設計に活用されている。

全体として、これまでの達成度は90%と考える。

(2) 研究全体の進捗状況について

従来と同種の研究では、デバイスというハードウェアの開発に目標が設定されていたが、本研究では、乱流制御システムへの適用という視点から個別デバイスの開発が行われており、実用に向けた具体的なセンサやアクチュエータの姿が現れてきている。特に MEMS による壁面剪断力センサはアレー化も行われ、高性能なデバイスが開発されている。順調に進捗していると思われる。

制御手法についても、MEMS による制御用アルゴリズムの評価、添加物による抵抗低減効果の高効率化といった成果が得られている。制御アルゴリズムについて、一層の検討が必要と思われるが、順調に進捗していると思われる。

また制御システムの簡単なプロトタイプも構築されつつあり、実際にシステムを構築する場合の開発目標も明確になってきた。

一方、アクチュエータについては各種デバイスが提案されているが、さらなる飛躍が求められる。

全体として、研究は順調に進捗している。

10.2 目標について

(1) 目標設定が適切であったか否かについて

適切であった。

(2) 最終目標の変更の必要の有無について

システム構築に向けて研究が順調に進捗している現段階では変更の必要は無い。

10.3 研究成果について

(1) 研究成果の科学的価値について

乱流という複雑現象の制御を実現するためには、現象の理解が不可欠である。本研究では、計測技術、シミュレーション技術といった基礎的研究ツールの強化を実現しており、広く乱流研究に貢献すると考えられる。

具体的には、レーザーを利用した非接触 3 次元高精度観測法、直接数値シミュレーション技術、マイクロデバイス設計製作技術の確立ならびに現象理解の深化に貢献している。

(2) 研究成果の波及効果について

センサ、アクチュエータといった個々の制御用要素に特徴的なものが生まれつつある。例えば、壁面剪断力センサは世界でもトップクラスの性能を有し、乱流制御のためのセンサというだけでなく、流体計測のあり方に革新をもたらす。また、微細気泡の発生手法は洗浄、化学反応促進といった製造に関わる分野での利用が期待できる。つまり、制御システムを構築するそれぞれの要素そのものがすでに成果として利用可能な段階に近づいている。言い換えれば、本来の目的である乱流制御以外の分野、例えば医療・マイクロラボといったより広い領域で活用できる可能性がある。今後、プロジェクトの枠を越えた成果の幅広い利用が期待できる。

また、本研究はかつて先行し近年一時中断していた米国の研究開発に刺激を与え彼の地での学会活動を活発化している。国内学会においても特別セッションが生まれ、産学官連携活動の機運が醸成されている。また、産業界からも具体的な適用機器について幾つか意見が出されている。

非常に広い波及効果があると思われる。

(3) 研究成果の情報発信について

多数の学術論文、学会発表を通じて広く成果を発信している。また毎年開催されている国際シンポジウムにおいても成果発表を行っている。web 上で成果を公開している。さらに、関心のある企業各社と情報交流をし、必要に応じて直接研究活動への参加を求めており、十分な情報発信がなされていると思われる。

10.4 研究体制について

(1) サブテーマ責任者の指導性について

各独立行政法人研究所、大学、民間からの多様な研究者の参加の下に定期的なミーティングを開催して研究開発の目標・方向についての認識の共有化を促進し、個々の担当研究者と随時討議することにより研究の細部についても十分その進捗状況を把握し、さらに、予算執行においても研究参加者の要求を適宜調整して研究の円滑な実施を実現しており、サブテーマ責任者としての指導性を十分に発揮している。

(2) 開放的融合研究に向けた取り組み(積極的な融合が図られているか)

一般に、独立行政法人研究所・大学・民間からの研究参加者の間には研究の方向性に差があるが、サブテーマ責任者は、現象の基礎的理解、デバイス製造技術、制御理論等、乱流制御研究が要求する広範囲な対象分野について、大学がより基礎的な研究を、独立行政法人研究所がより応用的な研究を実施する形を整え、サブグループ内における研究資源の有効活用を図っている。また、関心を寄せている複数民間企業との情報交流により、研究開発に反映させている。さらに、実験機器の共同利用や共同実験など研究所間の人事交流にも積極的である点も評価できる。

11. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：研究目標の概要・成果の概要

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：乱流燃焼制御の研究（小川哲（航空宇宙技術研究所））

11.1 研究目標の概要

まず、乱流燃焼制御の目的を、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範囲の拡大とした。さらに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、制御により安定範囲を拡大することとした。

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。一方で、乱流燃焼制御は我が国において殆ど行われていない状況から、そのために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、システムとしての制御理論技術の確立等の広い分野に貢献する。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することにより、実用化に向けた燃焼器モデルの設定を行い、基礎研究との連関を取りながらアクチュエータ・センサ・コントローラを含めた総合的モデルとして構成することとし、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を研究・開発することを目標とする。

このように、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最終目標とする。

11.2 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(航空宇宙技術研究所)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 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べく研究を進めてきた。計測技術は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、半導体レーザー分光システム (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 を用いた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の測定を高精度に行う方法の開発を行い、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、時系列データを解析することにより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。

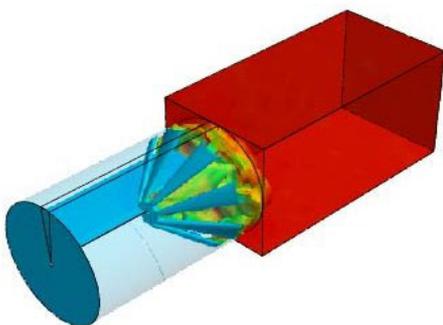
まずコーン形保炎器、可変スワラ、2次火炎から構成される保炎用デバイスを作成し、保炎性能及び排ガ斯特性の確認を行い、モデル燃焼器への組み込みを実施した。

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。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、モデル燃焼器への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。保炎に必要な再循環領域は、パイロット部、保炎器の外周裾野部に大きく形成され、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。今後制御則の解明のためのツールとして LES が利用できる可能性を示している。



LES によるモデル燃焼器の数値シミュレーション結果 (温度場)

12. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：研究成果公表等の状況

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：乱流燃焼制御の研究（小川哲（航空宇宙技術研究所））

12.1 研究成果発表等

（1）研究発表件数

	原著論文による発表	査読つき Proceedings	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	11(0) 件	4(0) 件	2(0) 件	96(0) 件	113(0) 件
国外	22(5) 件	32(0) 件	3(0) 件	27(0) 件	84(5) 件
合計	33(5) 件	36(0) 件	5(0) 件	123(0) 件	197(5) 件

（注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと

（2）原著論文による発表の内訳

国内

1. 店橋護 他 高強度乱流予混合火炎の構造，日本機械学会論文集(B 編)，Vol.67, No.654, pp.536-543, 2001.
2. 池田裕二 他 局所自発光計測による乱流予混合火炎構造の観察，日本機械学会論文集B編，67 巻 658 号
3. 溝渕泰寛 他 水素噴流浮き上がり火炎の構造について 日本燃焼学会誌5月号
他計11件

国際

1. M. Tanahashi, Y. Nada, Y. Ito, and T. Miyauchi, Local Flame Structure in the Well-Stirred Reactor Regime, Proc. Combust. Inst., Vol. 29, 2002, in press.
2. G-M. Choi, M. Tanahashi, Y. Li, and T. Miyauchi, Verification of Reduced Kinetic Mechanism by Hydrogen-air Non-Premixed Flame Formed in Shear Layer, Thermal Science and Engineering, Vol.10, No.4, 2002, in press
3. A Numerical Analysis on Structure of Turbulent Hydrogen Jet Lifted Flame, Proc. Combust. Inst., Vol. 29, 2002, in press.
4. Shinjou, Y. Mizobuchi, S. Tachibana and S. Ogawa, Numerical simulation of flame behavior in a gas turbine combustor toward its control, Proc. Combust. Inst., Vol. 29, 2002, in press.
5. K.Hayashi, Y. Yamazaki, H. Sato, Active Control of Combustion Oscillations for Premixed Combustion Systems, J. Physics D, 2002, in press
6. Y. Li, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Sound Generation in Compressible Mixing Layers, JSME International Journal, Series B, Vol.44, No.4, pp.505-512, 2001.
7. Yoshida, An Opposed Jet Burner for the Study of High-Intensity Combustion, Measurement Science and Technology, Vol. 10, No. 12, pp. 1-3. (2000, 12)

他計27件

（3）その他の誌上発表

1. T. Miyauchi, M. Tanahashi and Y. Li, Sound Generation in Chemically Reacting Mixing Layers, Smart Control of Turbulent Combustion, Springer, pp.28-38, 2001.

2. 水野 毅 機械工学年鑑 (1999 年), 機械力学・計測制御, 9. 運動と振動の制御
他計 5 件

(4) 査読つき Proceedings

1. S. Tsukinari, T. Saito, M. Tanahashi, T. Miyauchi, and G-M. Choi, Estimations of the Heat Release Rate in Methane-air Premixed flames by CH-PLIF, The 6th ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf., 2002, submitted.
2. Ikeda Y., Kojima J., Hashimoto H. and Nakajima T., “Detailed Local Spectra Measurement in High-Pressure Premixed Laminar Flame”, 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA paper 2002-0191, Reno (2002)..
3. M. Tanahashi, Y. Ito, M. Fujimura and T. Miyauchi, Local Flame Structure in Hydrogen-Air Turbulent Premixed Flames, IUTAM Symp. on Turbulent Mixing and Combustion, pp.102-103, 2001.
4. M. Tanahashi, Y. Ito, Y. Yu and T. Miyauchi, The Structure of Hydrogen-Air Premixed Flames in High-Intensity and Small-Scale Turbulence, Proc. 3rd Asia-Pacific Conf. on Combustion, pp.75-78, 2001.
5. 黒澤要治、吉田征二、山本 武、鈴木和雄、旋回型ガスタービン燃焼器内火炎の構造、第 15 回空気吸込式エンジンについての国際シンポジウム、(2001)
6. M. Tanahashi, Y. Ito, M. Fujimura and T. Miyauchi, Local Flame Structure in Hydrogen-Air Turbulent Premixed Flames, IUTAM Symp. on Turbulent Mixing and Combustion, pp.102-103, 2001.
7. Suzuki. H., Mizuno T. Tracking Control Using Exogenous Signals Synchronized with Reference Signals Proc.5th International Conference on Motion and Vibration Control, pp.187-192 2000.12.

他計 3 6 件

12.2 特許出願等

“希薄予混合燃焼器”、山本、特願 2002-207547、2002 年 7 月 16 日

12.3 受賞等

1 件 (国内 1 件、国外 0 件)

1) 2001 年日本機械学会論文賞

店橋護、名田譲、今村征寛、宮内敏雄

「水素・空気乱流予混合火炎の局所構造」

13. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：開放的融合研究に向けた研究体制の概要

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：乱流燃焼制御の研究（小川哲（航空宇宙技術研究所））

13.1 サブテーマ責任者の指導状況

本サブテーマ研究が開始された当初、研究遂行に関して様々な困難があった。まず、研究対象とする乱流燃焼現象の複雑さ故に、「制御」というキーワードについて研究参加者それぞれで理解が異なっていた。乱流燃焼を能動的に制御するという課題は、我が国では殆ど行われていなかったこともその一因であろう。その理由は、エンジン等の具体的機器を対象として研究を進めてきた燃焼技術者の一部は、機器のロバスト性を考慮したとき燃焼を能動的に制御する方法に疑問をもっていたこと、我が国では殆ど行われていなかったテーマであることなどである。そこでサブテーマ責任者は、研究参加者に対し本研究の意義展望を提示し、サブテーマ研究グループとしてまとめあげることから取りかかった。

平成12年度の評価委員会の評価では、研究体制が不十分である、研究目標が十分に絞り込まれていないなどの指摘があり、サブテーマ責任者は、これを受けて平成13年度に、研究グループメンバーの会合あるいは個々のメンバーとの意見交換を強化し、グループ全体の研究に対するコンセンサスが得られるよう努力した。特に、民間から研究者の参加を求め、実機レベルでの問題点を明らかにすることで「燃焼制御」の具体的なターゲットを明確化した。このターゲットの明確化をベースに、個々の研究メンバーの役割・グループ内での位置づけを明確にし、その結果、グループとしての機能が円滑に進み始めた。

複数の独立行政法人研究所ならびに大学との連携は、組織の背景が異なるため困難であったが、ほぼ毎月1回、民間からのメンバーも含めての燃焼制御会議を開催し、進捗状況、問題点の洗い出し、研究論文紹介等を行い意見の調整、研究方向に対する共通理解を深める努力を行った。個別会合もこれと平行して行われ、研究の具体的課題についての討議・討論を行った。以上の作業により、研究の方向性及び体制が大きく改善された。

13.2 開放的融合研究に向けた取り組み状況

研究の方向性を絞り込みながら、参加組織の枠にとらわれない研究体制づくりに取り組んだ。

従来より、独立行政法人は新しい技術開発を目差す応用指向の研究を実施してきた。一方、大学は、基礎研究、燃焼に限定すると、火炎構造解明等の研究が主であった。また民間研究機関は、製品開発に直結した技術開発を行っていた。このように、それぞれ研究の方向性が全く異なる状況にあった。本プロジェクトの意義はそうした立場の全く異なった組織に所属する研究者が一堂に会して一つの先端的技术を目差すことにあり、ともすれば各々閉鎖的である組織間を横断的にまたがる新しい研究形態を創出できるのではないかと考えた。

研究開始当初、組織間のシステムの違い、物の考え方の相違等、バラバラな研究を束ねた形で研究が進行したが、次第に研究者相互の意思疎通が図られ、研究そのものも相互に補完する形で進行し始めた。特に、評価委員会の指摘に従い民間から研究者の参加を求めたことは、ニーズから遊離していない研究ターゲットを定められ、それ故研究参加者の研究のベクトルの向きが完全に揃い、非常に有益であった。

次に、「乱流燃焼制御」研究への共通意識を背景として、研究体制を整えた。組織によらず、個々の研究者の特徴を反映させるため、応用燃焼グループ、基礎燃焼グループ、制御システム研究グループ、高度計測技術研究グループを構成した。複数のグループに参加する研究者も存在し、ある研究グループのニーズが他の研究グループから生まれる、といった状況が生まれてきている。この組織作りにより、独法(独立行政法人研究所)同士の協力体制、独法と大学・民間との協力体制が強固なものとなった。具体的には、航技研のシミュレーションと大学における計測結果の比較、海技研の燃焼計測システムの大学との共同利用、といった事例が生まれている。

14. サブテーマ2「乱流燃焼制御」：評価結果

課題名：乱流制御による新機能熱流体システムの創出

サブテーマ名（責任者（研究機関名））：乱流燃焼制御の研究（小川哲（航空宇宙技術研究所））

14.1 進捗状況について

(1) 目標の達成度について

プロジェクト前期は、特に制御システムの個別要素（センサ、アクチュエータ、制御手法）の基盤技術の確立と、制御手法を明確化するための現象の把握を目的とした計測技術・シミュレーション技術の向上を目標とした。

乱流燃焼制御のターゲットを明確にし、それに従って現象理解を着実に深めている。特に、浮き上がり火炎、燃焼騒音のシミュレーション、高度な光学計測は今後の研究の展開に有用である。また火炎安定化（特に燃焼騒音・振動抑制）のための制御手法も複数考案されており、一部で実際の効果が確認されている。ただし、保炎についてはまだ改善の余地がある。また、制御のためのアルゴリズムについてはスタートしたばかりといえ、今後の発展に期待する。アクチュエータについても音響用デバイス、高速ノズル等、複数種の性能評価を行っている。実用に向けての性能改善のための指標が固まりつつある。また、光学センサも高性能なものが生まれているが、実用に向けて適用可能性の評価が望まれる。

計測技術及び DNS 等のシミュレーション技術も高度なレベルに達しており、現象理解に有用である。ただし、計測・シミュレーション相互の結果の対応が十分ではなく、今後の進展に期待したい。

制御システム実現に向けて個々の要素技術をさらに高度化する必要がある。全体として、これまでの達成度は80%と考える。

(2) 研究全体の進捗状況について

高度な計測技術、シミュレーション技術といった基礎については世界でもトップの成果が上がっている。

また、乱流燃焼用制御デバイスとしては、燃焼騒音・振動制御用アクチュエータがユニークである。ただし、実用化に向けてさらなる性能向上が望まれる。センサとしても半導体レーザによるモニタリングシステムの性能は高く、時間・空間分解能ともに十分な性能を誇る。しかし、これも実用への適用に向け一層の進展が望まれる。

制御手法については、燃焼騒音・振動抑制手法にユニークなものがある。制御アルゴリズムについて、一層の検討が必要と思われるが、順調に進捗していると思われる。

また制御システムの簡単なプロトタイプも構築されつつあり、実際にシステムを構築する場合の開発目標も明確になってきた。

以上、個々の要素技術についていくつかの見るべき成果が得られており、また、それらを総合してシステムとして実証するための、メタン希薄予混合ガスタービンを想定したモデル燃焼器が製作されたことは有意義であったが、その形状など具体的な点については改良の余地が多く、早急に改善の方策をとる必要がある。

困難な課題を対象としつつも、全体としてほぼ研究は順調に進捗している。

14.2 目標について

(1) 目標設定が適切であったか否かについて

適切であった。

(2) 最終目標の変更の必要の有無について

システム構築に向けて研究が順調に進捗している現段階では変更の必要は無い。

14.3 研究成果について

(1) 研究成果の科学的価値について

乱流燃焼という複雑現象の制御を実現する現象への理解が不可欠である。そのため、本研究では、計測技術、シミュレーション技術といった研究ツールの強化を実現しており、広く乱流研究に貢献すると考えられる。

具体的には、レーザーを利用した高時間分解能、高空間分解能を有する計測システム、燃焼場の直接数値シミュレーション技術の確立が現象理解を深めている。

(2) 研究成果の波及効果について

まず計測及びシミュレーション技術が世界でもトップにあげられる。特にシミュレーション技術の向上はめざましく、従来得られていなかった知見が得られるようになってきている。これらは乱流燃焼制御において有用のみならず、燃焼器設計といった製造業の基盤に貢献する。また、燃焼騒音・振動抑制のためのアクチュエータに特徴的なものが生まれつつある。ただし、音響場を利用する方法や高速バルブによる2次燃料噴射は用いられているデバイスにさらなる改善の余地があり、実用化されれば実機にすぐにも利用可能である。

広い波及効果があると思われる。

(3) 研究成果の情報発信について

多数の学術論文、学会発表を通じて広く成果を発信している。また毎年開催されている国際シンポジウムにおいても成果発表を行っている。web上で成果を公開している。さらに、企業から直接研究活動への参加を求めており、十分な情報発信がなされていると思われる。

14.4 研究体制について

(1) サブテーマ責任者の指導性について

研究開始の初年度において、研究体制が不十分である、研究目標が十分に絞り込まれていないなどの問題点の指摘が評価委員会によってなされたが、それを受けて次年度以降、定期的なミーティングの開催、集中討議などにより状態が改善され、サブテーマ責任者の指導性も向上し、概ね十分な指導性を発揮していると言える。また、予算執行においても研究参加者の要求を適宜調整することで、研究を円滑に実施している。ただし、一方で多数の研究者が参加することと引き替えに、研究内容が総花的になる傾向が多少見られる。燃焼制御が要求する技術要件が多岐にわたることから考えて致し方のない部分もあるが、今後、各研究者の協調を保ちつつ、制御システムの具体化に向けてより集中的な研究方針の策定が望まれる。また、後半期においては成果をまとめ上げる必要があるため、サブテーマ責任者の一層の指導性が求められる。

(2) 開放的融合研究に向けた取り組み(積極的な融合が図られているか)

一般に、独立行政法人・大学・民間、それぞれの研究参加者は研究の方向性に差が見られる。サブテーマ責任者は、その違いを越えた研究体制を整え、研究者相互に協力しあえる状況を生みだしている。特に、民間企業からの参加を求め、研究対象の明確化をはかりグループのまとまりを強固なものとした。一方で、人事交流も積極的に行い、研究所間での共同実験も行なわれており、さらに実験機器の共同利用も頻繁になされている。特に大学と独法間の協力体制は十分であり、積極的な融合が図られていると言える。一方で、独法間の協力が実質的なもの、論文・特許等の具体的な成果の形で現れてこない。この点に改善の余地がある。