

	なかむら	ひさし		
氏名	中村	寿		
授与学位	博士	(工学)		
学位授与年月日	平成18年	3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則	第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科	(博士課程) 航空宇宙工学専攻		
学位論文題目	超音速流における	PTV計測を用いた水素噴流燃焼の研究		
指導教員	東北大学教授	小林 秀昭		
論文審査委員	主査 東北大学教授	小林 秀昭	東北大学教授	升谷 五郎
	東北大学教授	佐宗 章弘	東北大学助教授	滝田 謙一

論文内容要旨

第1章 序論

次世代航空推進系として超音速燃焼ラムジェット (スクラムジェット) エンジンが期待されており, 研究開発が進められている. スクラムジェットは広い飛行マッハ数で動作するため, 燃焼器内の流れ場の構造は大きく変化する. 特に, 燃焼器内には多数の衝撃波が存在し, 燃焼安定性に影響を及ぼす. このため, スクラムジェット燃焼器における代表的な燃料供給方法である壁面からの水素燃料の噴射に対して, その流れ場と衝撃波の干渉に関する現象解明は極めて重要である.

超音速燃焼における最も重要なパラメータとして第一ダムケラ数 Da_1 がある. Da_1 は流れ場の特性時間 τ_f と化学反応の特性時間 τ_c の比で表される. 安定した燃焼では Da_1 を大きくする必要がある. 一方で, 超音速燃焼は乱流燃焼に分類されるため, 乱流ダムケラ数 Da_T も重要なパラメータと考えられている. $Da_T \ll 1$ のとき分散型反応帯と呼ばれ, その火炎構造は十分に解明されていないが, 局所的な消炎が発生していると考えられるため, 安定した燃焼には $Da_T \gg 1$ も必要な条件であると考えられる.

Da_1 や Da_T を用いた議論を行うためには, 速度場の計測が必要である. ピトー管や熱線風速計などの接触計測法は流れ場に外乱を与えるため, 適当ではない. レーザードップラー流速計 (LDV) は代表的な非接触速度計法であるが, 得られる結果が点であるため, 場の速度情報を取得するためには繰り返し実験を行わなければならない. 近年, 場の速度を計測する粒子画像速度計法 (PIV) が開発された. しかしながら, PIV では空間解像度と時間分解能が低いため, 乱流特性値を計測することは難しい. そこで, 本研究では超音速流における粒子追跡速度計法 (PTV) を提案する. PTV では空間解像度が高いため, 速度変動成分を解像することができると考えられる.

数値シミュレーションも流れ場の速度情報を取得するのに有効な手法である. 数値シミュレーションでは使用する計算モデルに注意を要し, 計算負荷が大きい, 実験よりも多くの情報を取得することができる. したがって, 数値解析結果と実験結果を比較し, 計算モデルを改良することや実験では得ることのできない情報を見積もることは非常に重要である.

近年、実験と数値計算を用いた融合計測手法が提案されている。PTV は演算負荷が小さいため、実験実時間にて計算機に PTV 計測結果を送信することができると考えられる。計算機では実験結果を用いることで、収束の加速が期待できる。したがって、PTV と数値シミュレーションによる融合計測手法はほぼ実験実時間にてあらゆる物理量を仮想的に計測できると考えられ、こうした特長は将来の超音速燃焼の制御に大変有効である。

以上のことから、本研究では燃料噴流と衝撃波の干渉現象を実験および数値計算によって解明することを目的とする。また、超音速流における PTV 計測を開発し、PTV 計測結果を用いた乱流特性値の計算方法を提案する。さらに、超音速流における PTV 計測と数値シミュレーションを融合した新しい計測法を開発を行う。

第 2 章 入射衝撃波と水素噴流燃焼の干渉現象に関する実験的研究

実験は東北大学流体科学研究所の超音速燃焼試験設備で行った。燃料噴射壁の噴射口は $0.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ の長方形である。衝撃波発生版の偏角は 6° と 10° を用いた。衝撃波発生版は主流方向に実験中に移動できるようにした。流れ場はシュリーレン法により可視化した。

入射衝撃波が噴流場に及ぼす空気力学的な影響を見るため、空気噴流と衝撃波の干渉現象を可視化した。衝撃波入射位置が噴射口の上流側のとき、噴射口上流側の剥離領域が拡大した。剥離領域の拡大は強い衝撃波を入射することで、より大きくなった。衝撃波入射位置が噴射口の下流側のとき、噴射口上流側の剥離領域の大きさは入射衝撃波がない場合の大きさに近づいた。シュリーレン写真からは噴射口下流側の剥離領域は明確に判別できなかった。衝撃波を入射したときの貫通高さは衝撃波を入射しないときの貫通高さより小さくなった。強い衝撃波を入射することで貫通高さはより小さくなった。

入射衝撃波が噴流場における燃焼の消炎限界に及ぼす影響を調べるため、燃料過濃な水素・空気予混合気を予燃焼させて超音速主流に噴射し、実験を行った。衝撃波入射位置が噴射口の下流側のとき、火炎の発光が確認できた。一方、衝撃波入射位置が噴射口の上流側のとき、噴射口上流側に大規模な再循環領域が予測されるにもかかわらず、火炎は確認できなかった。主流全温が高いと、衝撃波入射位置が噴射口に近づいても保炎できた。

第 3 章 超音速流における PTV 計測法の開発

超音速流における PTV 計測の開発を行った。カメラの視野は $28.4 \text{ mm} \times 28.4 \text{ mm}$ で、1 ピクセルあたりの空間解像度は $27.7 \text{ }\mu\text{m}$ である。従来、超音速流のような大流量の流動場では、PTV 計測が可能な、よく分散した固体粒子を供給することが困難であった。しかしながら、本研究では新たに固体粒子供給装置を開発し、斜め衝撃波周りの速度場を PTV 計測で初めて取得することができた。各粒子画像には約 2000 個のよく均一に分散した粒子が撮影され、少なくとも 1000 個以上のベクトルを取得することができた。得られた斜め衝撃波周りの PTV 計測結果は理論解析の結果とよく一致した。また、速度変動成分の空間分布を解像できることを示した。

第4章 PTV計測を用いた超音速空気流中の乱流特性値の算出

PTV計測結果を用いた超音速主流中の乱流特性値を計算する手法を提案し、実際に算出した。その結果、本研究における超音速主流では、速度変動成分の二乗平均が9 m/s、積分スケールが1 mm、テーラーマイクロスケールが0.4 mm、テーラーマイクロスケールを代表長さとした乱流レイノルズ数は50であった。従来は計測することができなかつた超音速流中における渦スケールを始めて計測することができた。

第5章 入射衝撃波と水素噴流燃焼の干渉現象に関する数値シミュレーション

乱流スケールと乱流強度が壁面噴射場にどのような影響を与えるかを調べた。従来のレイノルズ数を基にした乱流スケールと乱流強度の推定値は実験結果よりも大きかった。この違が噴射場全体の流れ場の構造や境界層内の速度分布に与える影響は大きくなかつた。しかしながら、噴射口下流側のせん断層において、水素燃料の超音速主流への乱流拡散に違いが見られた。第2章の空気噴射を模擬した数値計算結果は実験結果とよく一致した。さらに、噴射口下流側の剥離領域に衝撃波を入射したとき、せん断層で圧力と乱流運動エネルギーの上昇が見られた。また、実験では明確に可視化できなかつた噴射口下流側の剥離領域内に再循環領域が形成され、その大きさが拡大した。しかしながら、実験条件を模擬した化学反応を含む数値計算では、超音速主流中に火炎を形成することができなかつた。

第6章 PTV計測と数値シミュレーションを用いた実時間融合計測法の開発

実験実時間にてPTV計測を行い、得られた結果を計算機に転送する融合計測システムを開発した。計算機では得られたPTV計測結果を初期値として用い、非定常計算における陰解法の内部反復の収束加速に利用した。この融合計測法により、変動する斜め衝撃波をほぼ実験実時間にて計測できることを示した。このような非定常現象の数値シミュレーションには大規模な非定常計算が必要であったが、実験結果を逐次利用することで大幅な計算時間の短縮を達成できた。融合計測によって得られた衝撃波の変動幅はシュリーレン写真から得られた結果とよく一致した。

第7章 結論

本研究では、スクラムジェット燃焼器における基本形態のひとつである壁面からの燃料噴射場に対して、衝撃波を入射させ、その位置や強さが流れ場の構造や燃焼場へ及ぼす影響について、実験および数値解析により調べた。このような極限環境下における計測・可視化技術として、超音速流における粒子追跡速度計法（PTV）を初めて適用し、乱流特性値をPTVデータより算出する方法を提案した。そして、得られた乱流特性値を数値解析に利用した。さらに、PTV計測と数値シミュレーションを融合した新しい計測法（融合計測）を提案し、計測結果を考察した。

論文審査結果の要旨

超音速燃焼ラムジェットエンジンは次世代航空推進系として期待されているが、燃焼器内に多数の衝撃波が存在し燃焼安定性に影響を及ぼすため、超音速流における噴流燃焼と衝撃波との干渉に関する現象解明は極めて重要である。本論文は、超音速流において水素を壁面から噴射させ、さらに衝撃波を入射させた場合の流れ場と燃焼安定性への影響を、粒子追跡速度計法 (PTV) を用いた計測と数値解析により明らかにしたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、超音速流における水素噴流付近に衝撃波を入射させた場合の流れ場の可視化と燃焼限界測定を行い、衝撃波入射による上流はく離領域拡大の様子と消炎限界を明らかにしている。これは、超音速燃焼の基礎現象解明における重要な成果である。

第3章では、PTVを超音速流における速度計測法として初めて適用し、斜め衝撃波を含む流れ場の計測と誤差評価によりPTVの有効性を明らかにしている。これは超音速流の計測技術における重要な成果である。

第4章では、PTVの高い空間分解能を生かして、空間相関により乱流特性値を計測する方法を新たに提案し、マッハ数2.5の超音速流における乱流スケール及び乱流レイノルズ数を求めている。従来の定点計測では極めて困難であった超音速流の乱流計測に成功したことは、超音速乱流燃焼の解明と乱流モデル用いた数値解析を高精度化する上で重要な成果である。

第5章では、前章で求めた乱流特性値を流入条件に用い、水素噴流と入射衝撃波が干渉する超音速流の数値解析を行っている。さらに第2章の実験と同一条件における数値解析によって、入射衝撃波が水素噴流下流の再循環域を増大させ、保炎性が向上することを明らかにしている。これは、超音速燃焼の安定化に寄与する重要な知見である。

第6章では、PTV計測と数値解析を同時に行って多数の物理量を擬似的に高速計測する融合計測法を提案し、変動する斜め衝撃波に適用して現象を実時間で数値的に再現できることを明らかにしている。これは、超音速燃焼における計測技術の高度化と燃焼制御を実現する上で重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、超音速流における水素噴流と入射衝撃波の干渉が流れ場および燃焼安定性に及ぼす影響をPTV計測と数値解析によって明らかにし、さらに超音速流における計測技術の高度化を図ったもので、航空宇宙工学および燃焼工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。