

平成21年5月25日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19860009

研究課題名（和文） 高分解能瞬時速度場計測による衝撃波と水素噴流燃焼の干渉現象の解明

研究課題名（英文） Study on the interaction between combustion by hydrogen jet and shock wave using velocimetry with high-spatial and temporal resolution

研究代表者

中村 寿 (NAKAMURA HISASHI)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：40444020

研究成果の概要：スクラムジェット燃焼器内で縦横に発生する衝撃波と燃焼場の干渉現象について調べるため、粒子追跡速度計法による流れ場の速度分布計測、壁面圧力分布の計測、高速度シュリーレンによる流れ場の可視化および数値計算を行った。これらの結果、衝撃波を燃料噴射口下流側に入射することで、滞在時間の増加、圧力上昇による反応促進、および混合促進が得られることがわかった。このため、衝撃波を噴射口下流側に入射したとき、噴射口下流側のみで保炎することがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,340,000	402,000	1,742,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	402,000	3,102,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：Compressible Flow, Shock Waves, Combustion, Particle Tracking Velocimetry

1. 研究開始当初の背景

超音速燃焼ラムジェット（スクラムジェット）は高マッハ数で唯一高比推力を有するエンジンであり、将来の極超音速推進系として期待されている。燃焼分野での技術的課題である超音速燃焼は、スクラムジェット実現に必要な不可欠であり、特に壁面噴射場はひとつのモデルケースとして多くの研究がなされてきた。実際のスクラムジェット燃焼器内には多数の衝撃波が縦横に存在し、その位置と強さは飛行高度、速度、迎角により時々刻々と変動するが、エンジン内の衝撃波と壁面噴射場の干渉については研究が進んでいない。

研究代表者らはこれまでの研究において、衝撃波を壁面噴射場の燃料噴射口下流側に入射することで、低い主流全温にもかかわらず、燃料噴射口下流側の再循環領域における保炎を確認した。低い主流全温における保炎はスクラムジェットの低飛行マッハ数における性能改善に直結するため、極めて重要である。しかしながら、これまでの壁面噴射場における研究では、燃料噴射口の上流側再循環領域が保炎領域となっていることが報告されており、噴射口下流側の保炎領域と衝撃波の干渉現象に関する研究はなされていない。

2. 研究の目的

本研究では、衝撃波を噴射口の下流側に入射したとき、噴射口下流側再循環領域において保炎する新しい燃焼現象に注目して、入射衝撃波の位置が燃焼場と衝撃波の干渉現象に及ぼす影響について調べる。

3. 研究の方法

本研究で対象とする流れ場の模式図を図1に示す。衝撃波発生板はアクチュエーターで実験中にその位置を変更できるようになっている。これにより、入射衝撃波の位置を変更する。超音速流中における粒子速度追跡法 (PTV) を新たに開発し、これにより流れ場の速度分布を計測する。また、壁面圧力分布を計測し、高速度シュリーレン法による流れ場の可視化を行う。さらに、数値計算を行い、実験との比較を行う。

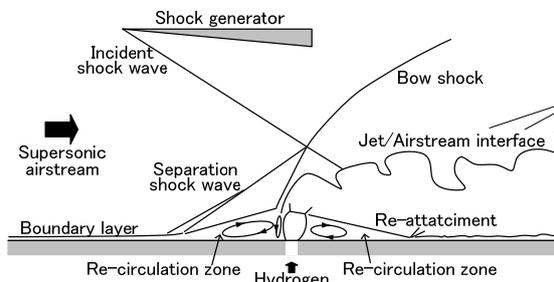


図1 研究対象の流れ場の模式図

4. 研究成果

(1) 壁面噴射場の速度分布計測

過去の研究で開発した超音速流への粒子供給装置を追加作成し、これを壁面噴射装置のチャンバー手前でバイパスするように接続することで、壁面噴射場のPTV計測に適した粒子濃度を供給することに成功した。さらに、壁面でのレーザー光の反射を低減する光学系を構築し、壁面噴射場における粒子画像を撮影することに成功した(図2)。これらとPTVの高い空間分解能という特徴を生かし、壁面噴射場における再循環流を含む流れ場の構造を詳細に得ることができた(図3)。

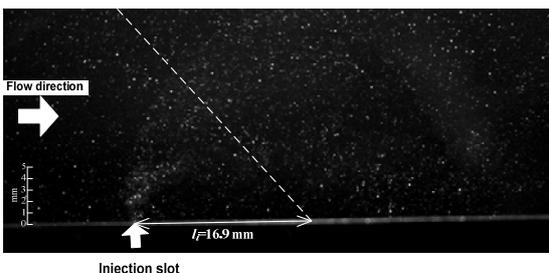


図2 粒子画像の一例 (点線: 入射衝撃波)

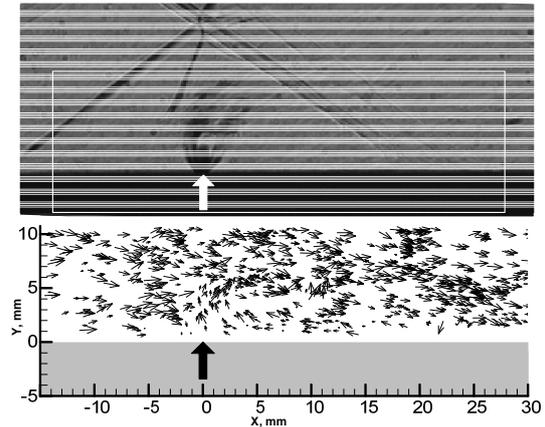


図3 PTV計測結果と計測領域のシュリーレン画像

(2) PTV計測結果から代表滞在時間を算出

得られた壁面噴射場の速度ベクトル分布から、噴射口下流側の再循環領域における代表長さ、代表速度、代表滞在時間を求めた。ここで、代表長さは噴射口下流側再循環領域の再付着点、代表速度は再循環領域内の最大流速、代表滞在時間は代表長さ/代表速度とした。衝撃波の入射位置を変化させたときの代表長さを図4に示す。衝撃波が噴射口の下流側に入射されると、代表長さが急速に大きくなった。一方、代表速度は衝撃波の入射位置によらず、ほぼ一定の値を示した。その結果、衝撃波が噴射口の下流側に入射されると、代表滞在時間が急上昇することがわかった。これは、衝撃波入射位置が下流であるほど低い主流全温でも保炎が達成できたことと一致した。すなわち、これまでシュリーレン法などの可視化技術で得ることのできなかった噴射口下流側での再循環領域は、衝撃波の入射により拡大し、燃料ガスの滞在時間が増加するため、保炎限界が拡大すると考えられる。

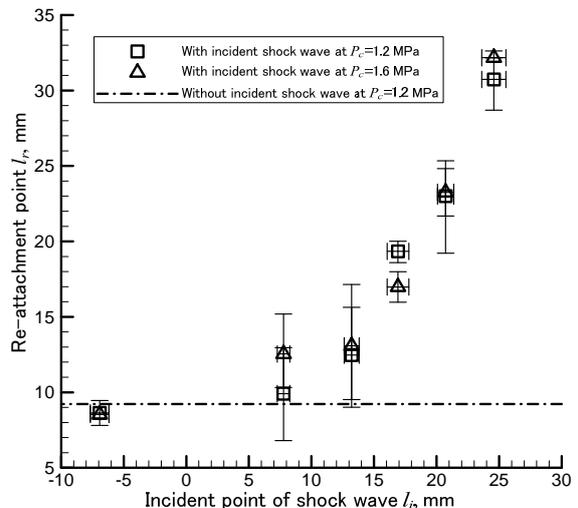


図4 衝撃波入射位置を変化させたときの代表長さ (P_c : 噴射全圧)

(3) 壁面圧力分布と PTV 計測結果の比較

壁圧計測用の圧力孔を備えた噴射壁を設計・製作し、入射衝撃波の位置を変えたときの壁圧分布を測定した。得られた壁面圧力分布から再附着点を求め、PTV 計測結果と比較した(図5)。その結果、両者はよく一致し、代表長さを PTV 計測結果から求める手法の妥当性が確認された。PTV 計測結果からは、代表流速と代表滞在時間が求められることから、その優位性が示された。

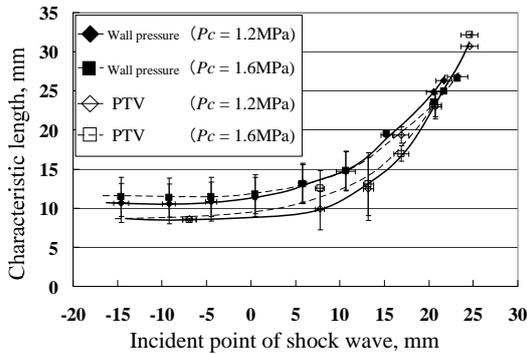


図5 壁圧分布計測結果と PTV 計測結果の比較 (Pc : 噴全射圧)

次に、衝撃波を入射しない場合と噴射口下流側に入射した場合の壁圧分布を示す(図6)。衝撃波を噴射口下流側に入射したとき、噴射口下流側の壁面圧力が大きく増加し、その再循環領域が拡大することがわかる。すなわち、再循環領域の拡大により燃料の滞在時間が増加し、圧力上昇により化学反応が促進される。一方、衝撃波を噴射口の上流側に入射したとき、噴射口下流側の再循環領域における滞在時間と圧力のいずれも大きくは変化しなかった。これらの傾向は、数値計算によっても再現することができた。

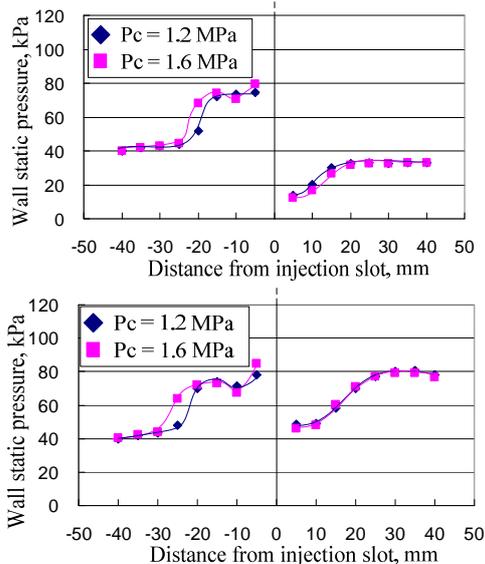


図6 壁圧分布 (上図：入射衝撃波無，下図入射衝撃波有，Pc : 噴射全圧)

(4) 高速度シュリーレンによる流れ場の混合拡散の可視化

高速度カメラを用いて撮影したシュリーレン画像を、衝撃波を入射しない場合(図7)と衝撃波を噴射口の下流側に入射した場合(図8)について示す。いずれも、1 μs 間隔で撮影した 102 フレームの中から 2 μs 間隔で 4 フレームを選択して表示してある。衝撃波を入射していない場合、いずれのフレームにおいても、流れ場の形状は大きく変動していない。しかしながら、衝撃波を噴射口の下流側に入射したとき、主流と噴流の混合層が大きく変動している様子がわかる。非定常数値計算を行った結果、衝撃波を噴射口の下流側に入射したとき、主流と噴流の混合層に渦構造が確認された。すなわち、衝撃波の入射により、噴射口下流側の再循環領域における主流の空気と噴流の燃料の混合が促進されていることがわかった。

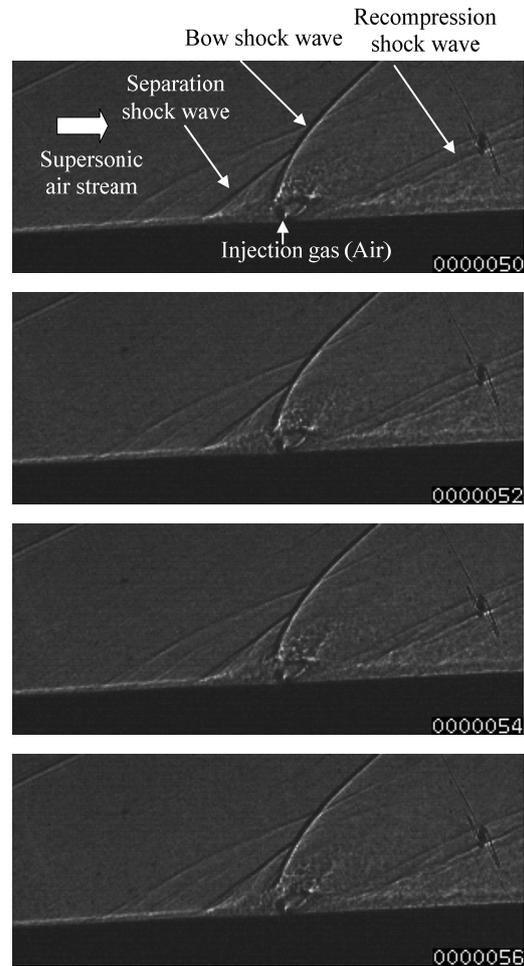


図7 衝撃波を入射しない場合の高速度シュリーレン画像 (噴射全圧 : 1.2 MPa)

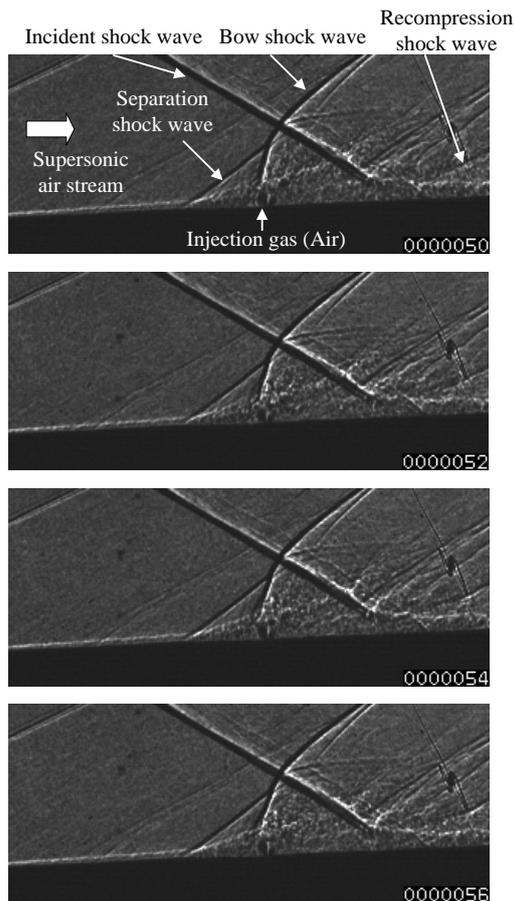


図8 衝撃波を噴射口下流側に入射した場合の高速度シュリーレン画像（噴射全圧：1.2 MPa）

(5) まとめ

以上のことから、衝撃波を噴射口下流側に入射することで、滞在時間の増加、圧力上昇による反応促進、および混合促進が得られるため、衝撃波を噴射口下流側に入射したときだけ保炎すると考えられる。以上の結果は、衝撃波と燃焼場の干渉が不可避なスクラムジェット燃焼器の設計において必要不可欠な基礎的知見となる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

- ① Hisashi Nakamura, Naoki Sato, Hideaki Kobayashi, Goro Masuya, Effect of the Location an Incident Shock Wave on Combustion and Flow Field of Wall Fuel-Injection, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 51, pp. 170-175, 2008, 査読有

- ② 中村寿, 佐藤直樹, 石田俊輔, 大上泰寛, 小林秀昭, 粒子追跡速度計法を用いた壁面噴射場と衝撃波の干渉現象の研究, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 55, pp. 35-41, 2007, 査読有

〔学会発表〕（計5件）

- ① 石田俊輔, 先光吉宗, 中村寿, 大上泰寛, 工藤琢, 小林秀昭, 超音速流における衝撃波と干渉する噴流場に関する実験および数値解析, 第46回燃焼シンポジウム, 平成20年12月4日, 京都
- ② Yoshimune Sakimitsu, Shunsuke Ishida, Hisashi Nakamura, Yasuhiro Ogami, Hhideaki Kobayashi, Effect of an Incident Shock Wave on the Flow Field with Wall Injection Normal to the Supersonic Mainstream, 3rd Tohoku-SNU Joint Workshop on Next Generation Aero Vehicle, Sep. 26, 2008, Sendai
- ③ Shunsuke Ishida, Naoki Sato, Hisashi Nakamura, Yasuhiro Ogami, Hideaki Kobayashi, PTV Measurement and Numerical Simulation of Wall Injection Interacting with Incident Shock Wave in Supersonic Flow, The Seventh International Symposium on Advanced Fluid Information and The Forth International Symposium on Transdisciplinary Fluid Integration, Dec. 15, 2007, Sendai
- ④ 中村寿, 佐藤直樹, 石田俊輔, 先光吉宗, 小林秀昭, 壁面噴射場における燃焼と流れ場の非定常性に及ぼす入射衝撃波の影響について, 第45回燃焼シンポジウム, 2007年12月7日, 仙台
- ⑤ 佐藤直樹, 石田俊輔, 中村寿, 大上泰寛, 小林秀昭, 入射衝撃波と干渉する水素壁面噴射場の保炎機構に関する研究, 第45回燃焼シンポジウム, 2007年12月7日, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 寿 (NAKAMURA HISASHI)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号：40444020

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 連携研究者

該当者なし