

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760105

研究課題名 (和文)

超音速流中への燃料のパルス噴射による混合・貫通の促進

研究課題名 (英文)

Enhancement of Fuel Mixing and Jet Penetration using Pulsed Injection into a Supersonic Flow

研究代表者

河内俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40415922

研究成果の概要 (和文)：

超音速流中のパルス噴流の非定常挙動を、ハイスピードシュリーレン法を中心とした風洞実験と非定常CFDによるパラメータ計算により調べた。その結果、パルス噴流の貫通特性にはヒステリシスが存在し、有効噴射速度比が上昇しているときの噴流貫通は下降時のそれと比べて大きくなること、またその原因が噴射時に生じる渦によって生じることを明らかにした。パルス周波数と噴流の貫通高さおよび混合には密接な関係があり、周波数を変化することで、噴流の貫通、および混合をアクティブにコントロールできることが明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：

This research experimentally and numerically investigated the penetration characteristics of the pulsed injection into Mach 2 supersonic crossflow. This research revealed the pulsed jet penetration in a rising phase of injection pressure was higher than that in a declining phase of injection pressure at a certain value of injection pressure. This hysteresis was owing to the upward flow produced by the pulsed jet like a slug which inclined toward the injection wall. The numerical simulations revealed the vortex rings was generated in each pulse cycle. They dominated the jet penetration and promoted mixing of the injectant with crossflow-air. Based on these experimental and numerical results, we conclude that the pulsed injection could control the jet penetration and mixing by changing its frequency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：圧縮・非圧縮，超音速混合

1. 研究開始当初の背景

次世代の旅客機や宇宙往還機用のエンジンとして、極超音速域でも作動する空気吸い込み式のスクラムジェットエンジンの研究が進められている。スクラムジェットでは、既存のジェットエンジンに比べて遥かに高いマッハ数域での作動が要求され、燃焼器内でも空気流は超音速となる。

そのため、燃焼器内における燃料の滞在時間が既存のジェットエンジン等と比べて極めて短く、燃料と流入空気の迅速な混合が重要な課題となる。また超音速流では、不要な突起物は衝撃波を形成し、大きな造波抵抗を生じる。そのため燃料は主にエンジンの壁面から噴射される。しかしながら、壁面から噴射された燃料は高速の空気流に押し流され、エンジン流路中央に達することなくエンジン外に出てしまい、流入してきた空気を効率的に使うことが出来ないということが問題になる。

これら課題の解決を目指し、世界各国でスクラムジェット燃焼器用の燃料噴射器の研究開発が進められている。しかしながら、既存の方法は噴射孔の形状を変更する等のパッシブな方法で、エンジンの作動条件等によっては大きく性能が低下するという問題を持っていた。そこで本研究では、このような問題点からアクティブに燃料の混合・貫通をコントロールできる可能性のある、噴射に時間的非定常性を取り入れた“間欠(パルス)噴射”に着目した。

2. 研究の目的

本研究では、スクラムジェット燃焼器における燃料の混合・燃焼/貫通促進を目的として、世界初の試みとなる燃料の超高速パルス噴射法を提案し、その有用性を示すことを

目的とした。具体的には下記の

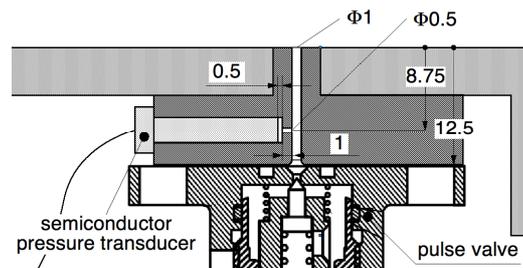
- (1) パルス噴流の貫通高さを定量化し、連続噴流の結果と比較を行い、その優位性を定量的に明らかにすること。
- (2) 噴射条件に関してパラメータスタディを行い、非定常性による噴流の貫通高さ増大、あるいは混合促進メカニズムを明らかにし、その効果を理論的に予測できるようにすること。
- (3) デモンストレーションも兼ね、パルス噴射器を実際の超音速燃焼器に搭載し、連続噴射よりも推力が増大することを立証すること。

の3つを目的とし研究を進めた。

3. 研究の方法

研究には、ハイスピードシュリーレン法によるパルス噴流の可視化を中心とした風洞実験と、非定常 RANS コードを用いた CFD 計算の二方面からアプローチした。

風洞実験では、高速で作動するパルスバルブと非定常噴射の状態をモニターできる半導体圧力センサを組み込んだパルス噴射器(第1図参照)を作製し、水素模擬ガスとしてヘリウムを噴射した非燃焼の風洞実験を行った。噴流の挙動はハイスピードシュリーレン撮影により可視化した。また風洞実験と併せて、シュリーレン動画から噴流特性を定量的に抽出する新しい画像解析手法の開発



第1図. パルス噴射器の詳細

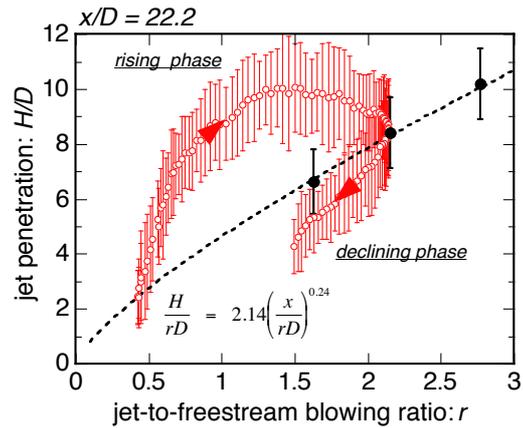
を行い、それを用いて噴流外縁の挙動、また噴流内に形成される大規模構造の大きさ、移流速度の定量化を行った。

風洞実験では装置の作動制限から、パルス周波数等のパラメータを大きく変化させることが出来ない。そこで非定常の数値計算コードを開発し、そのコードを用いて、パルス噴流の数値計算を行った。数値計算では、まず実験と同条件の計算を行い、計算が十分実験結果を再現することを確認した。そして、その後パルス周波数等のパラメータを変化させた計算を行い、パルス噴流内に生じる渦が噴流貫通に及ぼす影響、またそれらが混合に及ぼす影響を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 一般的に定性的な取り扱いしかされてこなかったシュリーレン画像から、特性抽出を行う画像解析手法を2種類開発した。一つは、Sobleフィルタを用いた噴流外縁を抽出する画像解析手法で、これにより噴流の貫通高さを定量化できるようになった。もう一つの方法は、二次元のフーリエ変換とサブピクセル補完を組み合わせた手法で、これによりシュリーレン画像内の乱流構造の支配的な大きさ、発生周期、またその移流速度を定量的に算出できるようになった。

(2) ハイスピードシュリーレン法による噴流、可視化と上述の画像解析により、連続噴流とパルス噴流の貫通特性を明らかにした。その結果、連続噴射により形成される流れ場は、有効噴射速度比 r と噴射孔径 d を用いた rd スケールにより整理できることが分かった。他方、パルス噴流の貫通特性(第2図)にはヒステリシスが存在し、有効噴射速度比が上昇しているときの噴流貫通は下降時のそれと比べて大きくなることが分かった。またその貫通



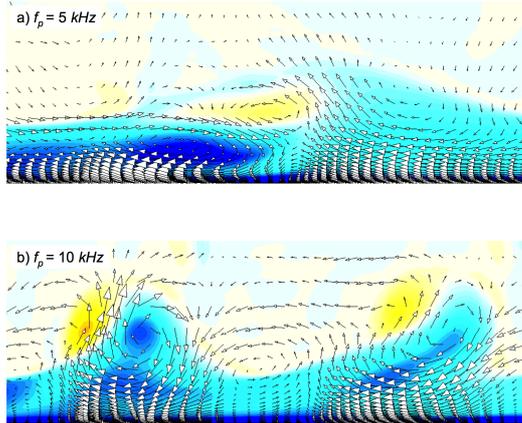
第2図. パルス噴流の貫通特性

は連続噴射よりも大きく、最大となるのは速度比がピークを迎えるより遙か手前の有効速度比の時間勾配が最大を迎えるあたりであることが分かった。

(3) このヒステリシスは、噴射と同時あるいは噴射直後に形成され、少なくとも噴射孔の30倍程度下流でもそのまま保持されることが分かった。またパルス噴流のヒステリシスの度合いはピーク噴射圧が大きくなっても、その上昇/下降の勾配が変化しなければ変化しないことが分かった。

(4) ヒステリシスの原因を調べるため、既存の数値計算コードを非定常計算が可能になるように拡張し、パルス噴流の数値計算を行った。数値計算においても、パルス周波数が5kHz以下の領域では、噴流貫通にヒステリシスが見られ、数値計算が十分実験を再現することを見いだした。この結果により、実験が非常に困難なパルス噴流の研究を数値計算により比較的簡便に行えるようになった。

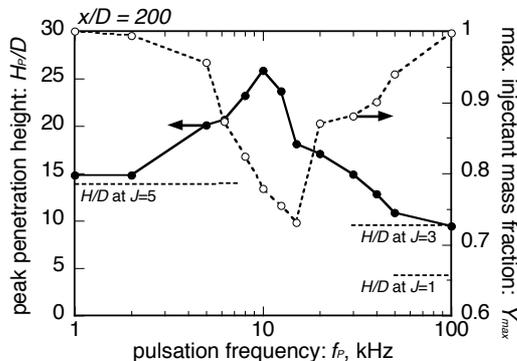
(5) 実験で観測されたヒステリシスの原因を数値計算結果から調べたところ、パルス周波数が比較的低い5kHz以下の領域では、パルス噴流がスラグ状に伸び、その結果噴流内に生じる渦対とそれに押し出されるように形成される渦対が干渉して、噴流の貫通高さにヒ



第3図. パルス噴流内に生じる渦構造とヒステリシスの関係, および貫通増加メカニズム

ステリシスが生じる事が分かった(第3図参照).

(6) 数値計算により, 実験では実現が困難なより高いパルス周波数条件での噴流貫通特性, また混合特性を調べた. その結果, 噴流の貫通, 混合特性とも, 最大を迎える最適なパルス周波数がある事が分かった(第4図). 噴流の貫通高さが最大を迎えるパルス周波数では, 噴流内に渦輪が形成され, 渦輪が誘起する高さ方向への誘起速度が噴流貫通高さを増強し, それが噴流混合を促進することが分かった(第3図参照). またそれよりも周波数がさらに大きくなると, 各パルス毎に生じる渦輪同士が干渉し合い, その結果噴流の貫通高さ, 混合性能とも低下することが分かった.



第4図. 噴流の貫通高さ, および混合に対するパルス周波数の影響

(7) これら結果から, パルス噴射を用いれば, そのパルス周波数を変化させることで, 噴流の貫通高さや混合特性を比較的自由にコントロールできることが明らかになった. 本研究により, スクラムジェット燃焼器における非常に有効な噴射方式としてパルス噴射が提案され, これまでにないアクティブな噴流制御が可能になったと言えよう.

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3件)

- ① T.Kouchi, K.Sasaya, J.Watanabe, H.Shibayama and G.Masuya, Penetration Characteristics of Pulsed Injection into Supersonic Crossflow, AIAA paper 2010-6645, 2010, 査読無.
- ② K.Sasaya, J.Watanabe, T.Kouchi and G.Masuya, Numerical Simulation of Pulsed Injection into a Supersonic Crossflow, AJCPP 2010-058, 2010, 査読無.
- ③ T.Kouchi, T.Hoshino, K.Sasaya and G.Masuya, Time-Space Trajectory of Unsteady Jet into Supersonic Crossflow Using High-Speed Framing Schlieren Images, AIAA paper 2009-7316, 2009, 査読無.

[学会発表] (計7件)

- ① T.Kouchi, K.Sasaya, J.Watanabe, H.Shibayama and G.Masuya, Penetration Characteristics of Pulsed Injection into Supersonic Crossflow, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 26, 2010, Nashville USA.
- ② 河内俊憲, 升谷五郎, 高速シュリーレンを用いた超音速噴流場のスペクトル解析,

第 42 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010, 2010 年 6 月 25 日, 米子.

- ③ K.Sasaya, J.Watanabe, T.Kouchi and G.Masuya, Numerical Simulation of Pulsed Injection into a Supersonic Crossflow, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, March 5, 2010, Miyazaki, Japan.
- ④ T.Kouchi, T.Hoshino, K.Sasaya and G.Masuya, Time-Space Trajectory of Unsteady Jet into Supersonic Crossflow Using High-Speed Framing Schlieren Images, 16th AIAA/DLR /DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Oct. 21, 2009, Bremen, Germany.
- ⑤ 河内俊憲, 升谷五郎, 柴山博治, 星野貴久, 超音速横風中のパルス噴射において観測された噴流貫通のヒステリシス, 日本航空宇宙学会北部支部 2009 年講演会ならびに第 10 回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 2009 年 3 月 11 日, 仙台.
- ⑥ 柴山博治, 河内俊憲, 升谷五郎, 超音速流におけるパルス噴射の貫通特性, 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008, 2008 年 6 月 12 日, 仙台.
- ⑦ 河内俊憲, 柴山博治, 升谷五郎, 高速シュリーレン撮影を用いた超音速流中における垂直噴流の貫通の評価, 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008, 2008 年 6 月 12 日, 仙台.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

① ホームページ

<http://www.scramjet.mech.tohoku.ac.jp/lab/index.htm>

② 第42回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2010
流体力学部門 最優秀賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河内 俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40415922

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: