

# 極超音速気流中に置いたくさび形状物体による液滴混合促進

学生証番号 47-156083 東本 有平  
(指導教員 鈴木 宏二郎 教授)

Key Words: scramjet engine, droplet, atomization, dispersion, hypersonic wind tunnel

## 1. はじめに

近年、極超音速機への需要が高まっており、旅客機分野においては更なる人・モノの移動の高速化による利便性向上を狙って、国内ではJAXA<sup>[1]</sup>、国外では欧州LAPCATプロジェクト<sup>[2]</sup>でマッハ5で巡航する極超音速旅客機が研究されている。一方、宇宙機分野においては、ロケットではなく酸化剤が不要な空気吸い込み式エンジンにより極超音速域まで加速することで、打ち上げ能力を向上させかつ再使用によりコストダウンを狙う2段打ち上げシステム(TSTO)が提唱されている。

こういった極超音速機に必要とされる推進器として、極超音速域で効率的なエンジンとしてスクラムジェットエンジン(図1)が提案されている。しかしながら、本エンジンは気流が速いことで未燃燃料が増加することや、不安定な燃焼が起こるといった問題を抱えているため、燃料の拡散において改善が望まれる。

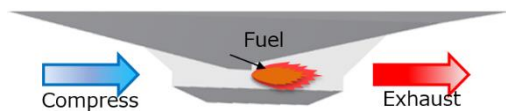


Fig.1 Schematic of scramjet

現在に至るまでは主に燃焼速度の速さから気体の水素燃料の使用を想定してその効率的な空気との混合などについて研究が行われてきた<sup>[3]</sup>が、一方で近年航続距離や機内タンクの簡素化などの優位性から液体の炭化水素系燃料が注目されている<sup>[4]</sup>。本研究では、エンジン内での液体燃料の混合を狙って混合促進モジュールを提案し、実験により実証するとともに、超音速気流中における液滴群の挙動に関する知見を得ることを目的とする。

特に、液体燃料のスクラムジェットエンジン内での素早く安定的な燃焼を達成する指標として、液滴の微粒化・拡散性に着目してモジュールの混合性能を評価する。

## 2. 実験概要

本研究では次のような液滴混合モジュールを提案する。エンジン壁面にくさび形状物体を設置することで、まず衝撃波を発生させて波面の圧力差により微粒化し、さらにくさび背後の膨張波領域により液滴が拡散されることを期待する(図2)。

このモジュールによる効果を検証するため、図3に示すように、マッハ7の気流を発生させる極超音速風洞に投入して、モジュール上流から噴射された液滴が混合される様子を動画で撮影した。さらに得られた動画に対し画像処理を行い、微粒化・拡散幅を検出してモジュールの混合性能を評価する(図4)。

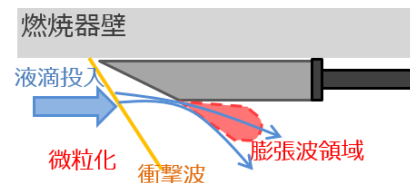


Fig.2 Mixing mechanism



Fig.3 Module in hypersonic wind tunnel

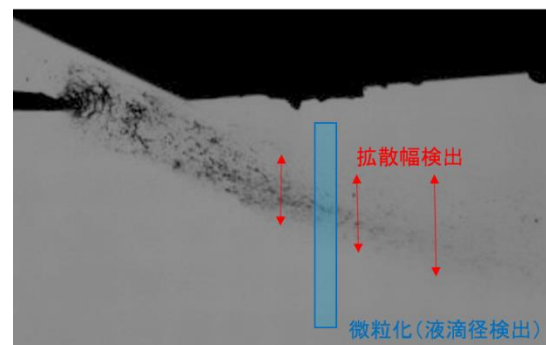


Fig.4 Typical Image of Droplets in Hypersonic Flow

図5に示すように、ケース1はくさび角 $30^\circ$ 、ケース2はくさび角を $60^\circ$ とくさび角の混合への寄与を比較し、さらにケース3は弱い衝撃波部分から水を噴射、ケース4は衝撃波の影響を受けないくさび直下から水を噴射してケース2の結果と比較することで、衝撃波による微粒化効果や液滴混合挙動を詳細に分析することを狙った。

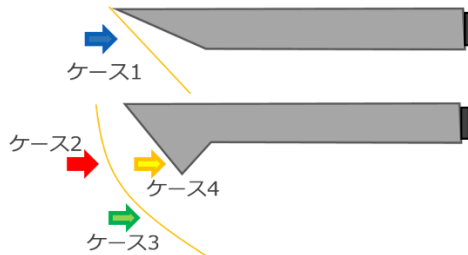


Fig.5 Experiment cases

### 3. 結果とその考察

#### 3.1 液滴微粒化の特性

図6は各ケースの液滴の確率分布である。ケース1と2を比較すると小さい液滴径の分布が増大していることから、くさび角を大きくすることにより微粒化が促進されたことが分かる。ケース2~4の比較から、衝撃波面とくさび近傍の高圧領域で主に行われていると考えられるが、衝撃波が強いケース2において最も顕著であることから、衝撃波が強く微粒化に影響していると考えられる。

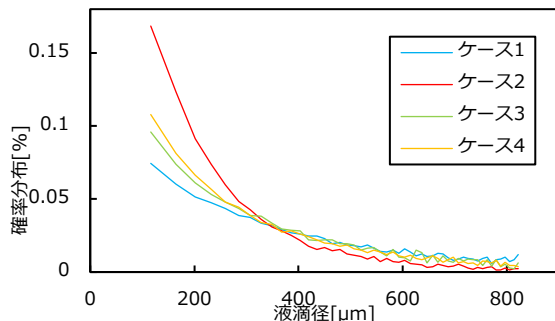


Fig.6 Diameter - Volume percentage

#### 3.2 液滴の拡散性

各検出位置における液滴の拡散幅のグラフを図7に示す。ケース1,2の比較から、くさびの存在により拡散性が大きく向上することが分かる。このうち特にケース2とケース3のくさび近傍の液滴挙動を比較することで、拡散を促進したメカニズムを考察する。

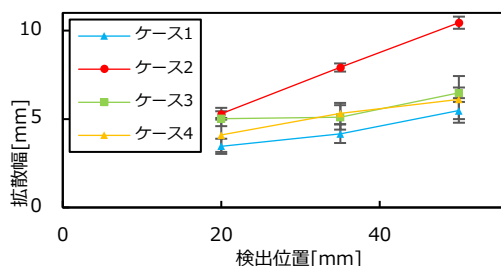


Fig.7 Dispersion Width

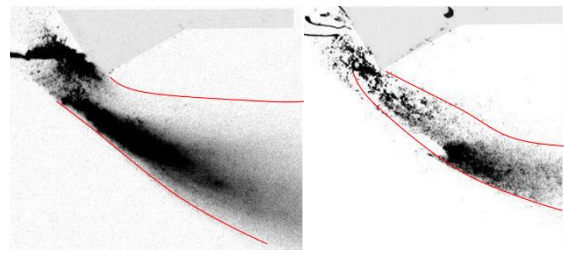


Fig.8 Dispersion result (a)Case2 (b)Case4

図8はケース2,4の結果の一例であり、赤枠は液滴群の外側境界を示している。これらの比較からケース2の方が拡散幅が大きいことが分かる。これは、両ケースとも液滴群がくさび近傍の高圧流れにより加速され下部に貫入するが、ケース4では巨大な液滴塊が慣性に従いほぼ全てが下部に貫入する一方、ケース2において液滴は衝撃波面による微粒化を受けているため、大部分は下部深く貫入する一方一部はくさびの背面に回りこむ流れに付随して壁面付近に拡散する。このため、ケース2では拡散が上端から下端まで広範囲に渡っていると考えられる。

このことから、微粒化された液滴群が高数密度を保ったまま壁面付近で加速されることで、壁面付近から遠方まで広く拡散することが分かった。

### 4. 結論

風洞実験により、くさび模型の液滴混合促進への効果を実証した。その結果、衝撃波による液滴の微粒化効果、さらにその背後の膨張波領域を含んだ流れ場による広範囲への拡散が確認できた。

特に、衝撃波により微粒化された高数密度の液滴群はくさび近傍の高圧流れにより加速され、慣性をもって気流に貫入しつつも徐々に拡散されていくという通常の液滴塊とは異なる挙動を観測できた。

#### 参考文献

- [1] 村上 哲(2006): 静粛超音速研究機構想について, 日本流体力学学会誌 **25**, p329-336
- [2] Steelant, Johan, et al. "Achievements obtained for sustained hypersonic flight within the LAPCAT-II project." *20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*. 2015.
- [3] 須浪 徹納 他(2002). スクラムジェットエンジンの混合・燃焼形態に関する考察—弱燃焼から強燃焼への遷移過程, 日本航空宇宙学会論文集 **50**, pp22-29
- [4] 今村 宰 他(2010). スクラムジェットエンジンモデル燃焼器内における液体正アルカン燃料の燃焼特性, 日本航空宇宙学会論文集 **58**, p116-122