

# 超音速流中への水素の噴き出しと混合に関する研究

横田 和彦\* 梶 昭次郎\*\*

Study on Mixing and Injection of Hydrogen into a Supersonic Flow

by

Kazuhiko YOKOTA

Graduate School, University of Tokyo

Shojiro KAJI

Department of Aeronautics, University of Tokyo

## ABSTRACT

The effects of the injection methods on mixing of hydrogen in the free stream are investigated. The numerical simulations are performed by solving the full two-dimensional Navier-Stokes equations using the explicit symmetric TVD scheme. As the injection methods, single injection, tandem injection, and parallel injection are examined. The injected hydrogen mass flow is constant in all cases. Injection methods are evaluated by the correlation between the mixing efficiency and the mass flow averaged total pressure loss at the outlet boundary of the computational region.

First, the injection angle is varied in case of single injection. The results show that the more forward the injection angle is leaned, the more deeply hydrogen penetrates into the free stream. Second case is tandem injection, and the distance between or mass flow ratio of two injections is varied. The results show that the upstream injection blocks the main stream, so the barrel shock of the downstream injection becomes larger and dominant in mixing in tandem injection. Last is parallel injection, and the distance from the wall to the injection is varied. The results show that parallel injected hydrogen can be mixed in the free stream in spite that it has no momentum perpendicular to the free stream. This shows that the perpendicular momentum of injected hydrogen hardly gives effects on mixing in a two-dimensional flow. The correlations between the mixing efficiency and the total pressure loss in all cases show that the mixing efficiency in the parallel injection is two times as much as in other methods of injection. The reason is that hydrogen can be mixed in the upper and lower directions. In addition, it is quantitatively shown that the perpendicular momentum hardly influences on mixing efficiency.

### 1. はじめに

\* 東京大学大学院

\*\* 東京大学工学部航空学科

スクラムジェットエンジンの中心的技術である  
超音速燃焼の実現には、燃焼の前段階として主流

と水素を混合させることが必要だが、燃焼室主流はマッハ数2以上という超高速流なので、この中へ燃料を噴射して混合させることは非常に困難である。事実、2次元においては主流に垂直に噴射するだけでは主流と水素が十分に混合しないことが指摘されている<sup>1)</sup>。

そこで、本論文では噴射方法を従来から一般に行われている垂直噴射だけではなく、さまざまな噴射方法による超音速の混合・流れ場を数値解析して、各々の噴射方法が主流と水素の混合に与える影響について検討を行った。

## 2. 計算モデルと支配方程式

現実のスクラムジェットエンジン燃焼室内の流れは当然3次元内部流であるが、噴射方法が混合に与える影響のみを調べるために混合に影響を与える他の要因を排除する。混合に大きく影響するものとして、3次元の縦渦と壁面の2つが考えられるので、これらを排除するために流れの2次元性を仮定し、壁は噴射スリットを設ける側のみに存在する自由流を対象とした。したがって、支配方程式は、2次元の完全Navier-Stokes方程式であり、さらに、乱流粘性の計算のために $q-\omega$ 方程式<sup>2)</sup>を、水素の混合計算のために化学種の保存方程式を同時に解いた。

これらの方程式を数値的に解くための計算手法としては、超音速流れ場に存在する不連続面を明瞭に捕らえることができるTVDスキームのうちYeeの陽的シンメトリックスキーム<sup>3)</sup>を使用した。そして、粘性項は中心差分によって評価を行った。

## 3. 噴射方法

水素の噴射方法としては、単独垂直噴射が一般的だが、この噴射方法では噴射した水素の浸透する高さが十分ではなく、その結果水素が燃焼室内で十分に主流と混合しない。そこで、噴射方法を工夫することによって水素の混合を制御することを考える。そして、水素の噴射方法としては次の4つを対象とした。

- (1) 単独噴射において噴射角を変化させる。
- (2) タンデム垂直噴射において前後の噴射の間

隔を変化させる。

- (3) タンデム垂直噴射において前後の噴射流量比を変化させる。
- (4) 平行噴射において噴射スリットと壁との距離を変化させる。

(ここで、タンデム垂直噴射とは側壁に設けられた前後2つの噴射スリットから主流に垂直に噴射することであり、平行噴射とは計算領域の入口に設けられた仮想的な噴射スリットから主流と同じ方向に噴射することである。)

これらの噴射方法と主流と水素の混合との関係について数値解析を行った。これらの噴射方法と混合の関係を評価する変数として、混合効率と流量平均全圧損失をとりあげた。ここで混合効率は次式で与えられる。

$$\eta_m = \frac{\int_{A_e} \frac{\rho u C_f}{\Phi'} dA}{\frac{m_f}{\Phi}}$$

ここで、

$$\Phi = \begin{cases} 1 & (\phi < 1) \\ \phi & (\phi \geq 1) \end{cases}$$

$$\Phi' = \begin{cases} 1 & (\phi' < 1) \\ \phi' & (\phi' \geq 1) \end{cases}$$

$A_e$  : ある断面

$\rho$  : 密度

$u$  : 速度

$m_f$  : 燃料流量

$\phi$  : 噴射当量比

$\phi'$  : 局所当量比

$C_f$  : 燃料質量分率

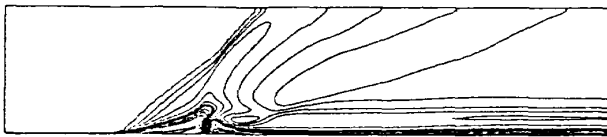
ただし、混合効率や全圧損失は噴射水素の流量に依存するので、各々の噴射方法の比較のために、噴射水素の流量を全ての噴射方法において単独垂直噴射の場合の流量値に統一した。そして、混合効率を増加させ、全圧損失を減少させる噴射方法を検討した。

主流と噴射条件は、Drummondらの論文<sup>4)</sup>に掲載されている単独垂直噴射の実験条件、すなわち主

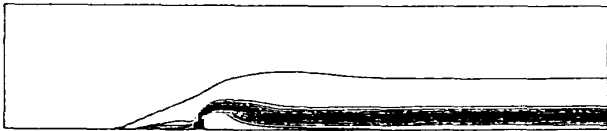
流（マッハ数2.5、130K、0.0169MPa）、噴射水素（マッハ数1、243K、0.728MPa）を基準とした。

### 3. 1. 単独噴射角度変化

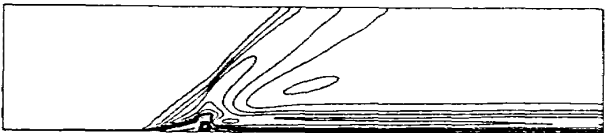
ここでは、単独噴射において30°~120°まで5°刻みで噴射角を変化させた場合の混合特性を調べた。（ただし、噴射角とは噴射スリット上流側の壁面とのなす角を表す。）噴射流量を単独垂直噴射の流量に保持するために、噴射スリット幅を噴射角に応じて変化させたグリッドを用いた。図1・2・3に噴射角が30°・90°・120°の場合の結果を示す。（90°とはもちろん単独垂直噴射のことである。）



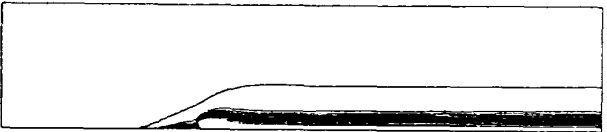
(a) マッハ数分布



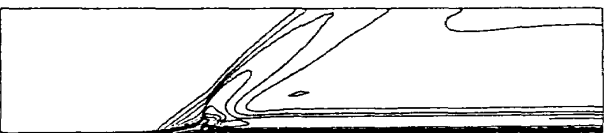
(b) 水素質量分率分布  
第1図 噴射角変化30°



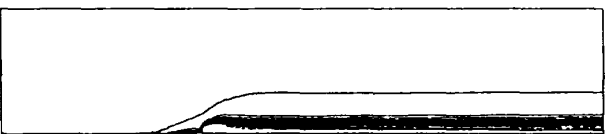
(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布  
第2図 噴射角変化90°



(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布  
第3図 噴射角変化120°

また、混合効率-全圧損失の相関グラフは図13に示してある。

噴射角が小さい図1では、バレルショックは主流に垂直に立っている。一方、水素質量分率分布（以下水素分布）でも、噴射スリット付近では噴射角が小さいと水素が主流中に少し高く浸透しているのがわかる。これは、噴射の上流向きの運動成分が主流の運動成分を打ち消して水素が高く浸透できたためと考えられる。ところが、噴射スリットの下流では水素は壁に押戻されている。そのため、図13の噴射角変化のグラフにおいて、噴射角が30°の場合と90°とを比較すると、混合効率は1%ほどしか改善されていない。しかし、浸透高さが高いために全圧損失は5%ほど悪化している。

また、噴射角が90°より大きい図3では、バレルショックは小さく壁に押しつけられたようになり、水素の浸透高さは低くなっている。ところが出口における水素分布領域はそれほど小さくない。このことは、図13において、全圧損失は3%ほど改善されているが、混合効率は1%ほどしか落ち込んでいないことから確認できる。

そして、図13の角度変化のグラフは全体としてほぼ縦軸に平行なので、噴射角の変化が混合効率にはほとんど寄与せず、一方、全圧損失には影響を与えることがわかる。

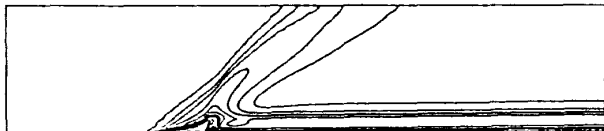
### 3. 2. タンデム垂直噴射の間隔変化

タンデム垂直噴射において2つの噴射スリット間の間隔を0~80mmまで2mm刻みで変化させた場合の混合特性を調べた。このとき、第1・2噴射（上流側を第1噴射、下流側を第2噴射と呼ぶ）のスリット幅を単独垂直噴射の場合の半分にしたグリッドを使用した。図4・5・6に間隔が2・10・60mmの場合の結果を示す。また、混合効率-全圧損失相関グラフは図13に示す。

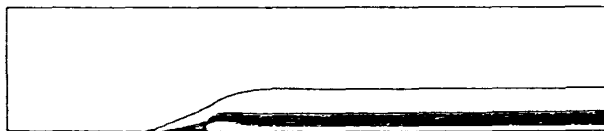
噴射の間隔が小さい場合には前後2つの噴射のバレルショックはほぼ同じ大きさだが、間隔が広がるにつれて第2噴射のバレルショックは大きくなってゆく。これは、第1噴射が主流をブロックする効果が間隔の増加に伴って大きくなることを示している。しかし、間隔がある程度大きくなる

と前後のパレルショックの大きさはほとんど変化しなくなるので、前後2つの噴射の干渉には限られた範囲が存在すると考えられる。

図13では、35mmで全圧損失が最小(3%減)、60mmで混合効率が最大(5%増)というように、全圧損失を最小に、混合効率を最大にする噴射間の間隔が各々存在することが判明した。また、60mm以上ではほぼ1点になっているので、60mmが噴射間の干渉範囲であると考えられる。

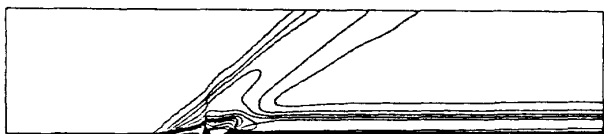


(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布

第4図 タンデム垂直噴射間隔変化(2mm)



(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布

第5図 タンデム垂直噴射間隔変化(10mm)



(a) マッハ数分布



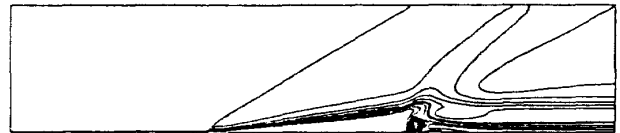
(b) 水素質量分率分布

第6図 タンデム垂直噴射間隔変化(60mm)

### 3. 3. タンデム噴射の流量変化

タンデム垂直噴射において2つの噴射の流量比

を変化させた場合の混合特性を調べた。第1・2噴射スリットの幅を1:19~19:1まで1刻みで変化させたグリッドを使用することによって、噴射流量比を変化させた。また、噴射スリット間の間隔は80mmに固定した。図7・8・9に流量比が1:19・6:14・12:8の結果を示す。混合効率-全圧損失相関グラフは図13である。

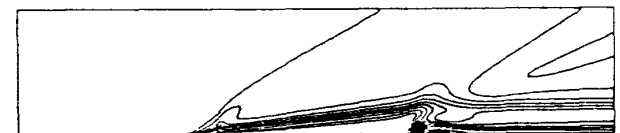


(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布

第7図 タンデム垂直噴射流量変化(1:19)

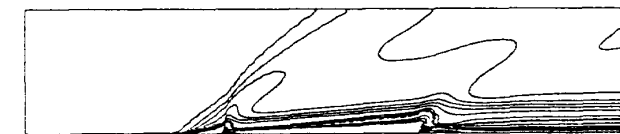


(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布

第8図 タンデム垂直噴射流量変化(6:14)



(a) マッハ数分布



(b) 水素質量分率分布

第9図 タンデム垂直噴射流量変化(12:8)

3. 2節と同様に第1噴射に主流のブロック効果が見られ、第2噴射が支配的になる。しかも、図7のように第1噴射を少量にした場合には、第2噴射のパレルショックは単独垂直噴射のパレル

ショックよりも大きくなっている。しかし、第1噴射の流量がある程度大きくなって第2噴射パレルショックが第1噴射のものより小さくなると、第1噴射の方が支配的になる。

図13において1:19は、全圧損失が単独垂直噴射に比べて7%ほど改善している。これは第1噴射の流量がわずかな場合は剥離点と一体と化して、剥離衝撃波やポーショックが弱まったためと考えられる。そして、全圧損失は第1噴射の流量を増やしてゆくに従って単調に増加してゆく。このように、第1噴射の流量は全圧損失に大きな影響を与えることが判明した。一方、混合効率はタンデム噴射によって全体に改善され、ある流量比（この場合には6:14）において最大値をとっている。このことから、タンデム噴射には混合効率を最大にする前後の噴射流量比が存在することがわかる。

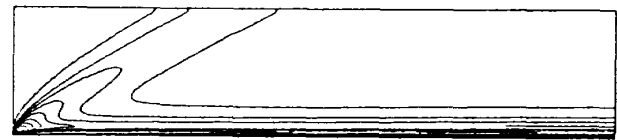
### 3. 4. 平行噴射

平行噴射において壁から噴射スリットまでの距離を0~30mmまで2mm刻みで変化させた場合の混合特性を調べた。図10・11・12に壁からの距離が0・10・20mmの結果を示す。（0mmとは壁に沿って噴射すること）混合効率-全圧損失相関グラフは図13に示してある。

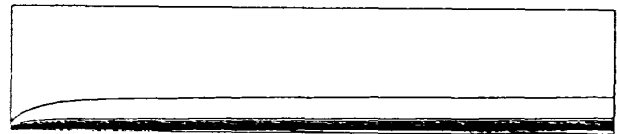
図10のように壁に沿って噴射する場合でも、出口における水素分布幅は垂直噴射とほとんど変わらないようである。このことは図13において平行噴射0mmの混合効率は単独垂直噴射のものより良いことで量的に確認できる。これは噴射気体が膨張によって主流と混合できることを示しているが、さらに噴射における主流に垂直な運動成分がほとんど混合に寄与しないことを示している。一方、全圧損失は垂直噴射に比べて6%改善されているが、これは流れに垂直な運動量がほとんど無いためであると考えられる。

壁から離れた所から噴射を行った場合には、図13において他の噴射方法に比べて2倍以上の混合効率が得られていることがわかる。この理由として、壁の影響が無くなって上下2方向への混合が可能であることが考えられる。さらに図11・12を見ると、噴射スリット下面で主流と衝突し

て発生した斜め衝撃波が壁で反射して再び噴射した水素に衝突したところで水素の混合領域が広がっている。このことから、斜め衝撃波には混合を促進する効果があることが判明した。

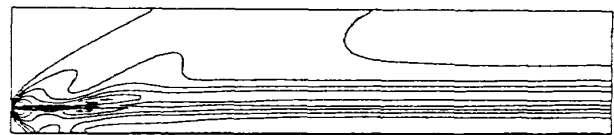


(a) マッハ数分布

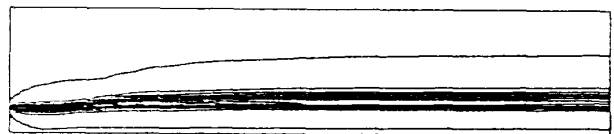


(b) 水素質量分率分布

第10図 平行噴射（壁からの距離0mm）



(a) マッハ数分布

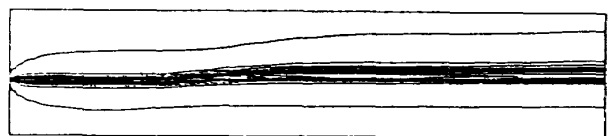


(b) 水素質量分率分布

第11図 平行噴射（壁からの距離10mm）



(a) マッハ数分布

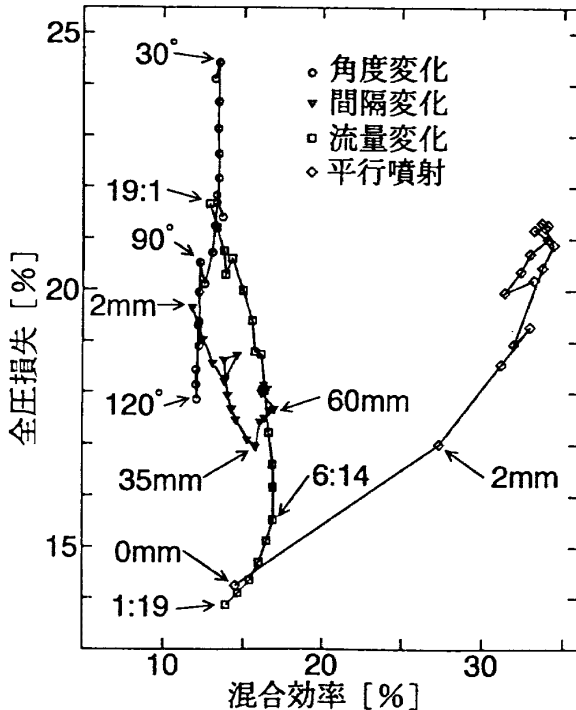


(b) 水素質量分率分布

第12図 平行噴射（壁からの距離20mm）

このように主流に垂直な成分が混合に寄与せず、全圧損失に大きく影響する理由は次のように考えることができる。主流に垂直な運動成分が増えれば水素の浸透高さは当然高くなる。その結果として水素の分布領域が増えても、主流と水素の接触境界の面積はほとんど増えない。主流と水素の混合はその接触面で起こるので、結局主流に垂

直な運動成分は混合に寄与しないことになる。一方、水素の噴射による壁が高くなれば当然全圧損失は増加するし、主流に垂直な運動量というのは主流中では大きな散逸を生じるのでこれも全圧損失の原因となる。



第13図 混合効率-全圧損失相関グラフ

#### 4. 結論

以上の解析により次のことが明らかになった。

- (1) 単独噴射角度変化の場合、噴射角によって全圧損失はかなり変化するが混合効率はほとんど変化しない。
- (2) タンデム噴射間隔変化の場合、混合効率を最大に、全圧損失を最小にする噴射スリット間隔がそれぞれ存在する。

- (3) タンデム噴射流量変化の場合、前後の噴射流量比に混合効率を最大にする値が存在する。また、全圧損失は、第1噴射の流量を増やすにしたがって増加する。
- (4) 平行噴射の場合、壁から離れた所からの噴射によって、他の噴射方法に比べて2倍以上の混合効率を得ることができる。
- (5) 斜め衝撃波には混合を促進する効果ある。
- (6) 主流に垂直な運動成分および水素の浸透高さは混合にはほとんど影響せず、全圧損失には大きく影響する。
- (7) 主流と水素の混合促進のためには、水素の浸透高さではなく、主流と水素の接触面積を第1に考えるべきである。

#### 参考文献

- 1) 石黒登美子, 小川哲, 和田安弘: 化学反応を含む圧縮流の数値計算, 第6回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 1988年, pp. 27-35.
- 2) Coakley, T. J.: Turbulence Modeling for the Compressible Navier-Stokes Equations, AIAA Paper 83-1693(1983).
- 3) Shinn, J. L., Yee, H. C. and Uenishi, K.: Extension of a Semi-Implicit Shock-Capturing Algorithm for 3-D Fully Coupled, Chemically Reacting Flows in Generalized Coordinates, AIAA Paper-87-1577(1987).
- 4) Drummond, J. P. and Weidner, E. H.: Numerical Study of a Scramjet Engine Flow Field, AIAA Paper 81-0186(1981).