

## 超音速流中に垂直に二次流を噴射したときの混合流れ場の構造に関する基礎研究

山根 善行\* 藤森 俊郎\* 安藤 安則\*  
麻生 茂\*\* 前川 昌三\*\* 反納 三智明\*\*  
福田 正大\*\*\*

### A STUDY ON MIXING ENHANCEMENT IN SUPERSONIC FLOW FIELDS WITH SECONDARY TRANSVERSE INJECTION

by

Yoshiyuki YAMANE, Toshiro FUJIMORI and Yasunori ANDO, IHI  
Shigeru ASO, Shozo MAEKAWA and Michiaki TANNOU, Kyushu Univ.  
Masahiro FUKUDA, NAL

#### Abstract

A fundamental characteristic of supersonic mixing field with transverse injection is examined by numerical and experimental studies. A sonic jet is injected perpendicularly into supersonic flow ( $M=4$ ) from a single hole on flat plate. The pitot pressure distribution is measured three-dimensionally. Numerical simulation is conducted in the flow field, and is compared with experimental data. It is shown that the present investigation is verified quantitatively and has a good reliability.

On the basis of numerical and experimental results, phenomena of the present flow field are discussed. It is observed that the counter-rotating vortex pair which rolls up from near the flat plate is generated and the mixing occurs as a result of entraining by these vortices. Jet core location is estimated from pitot pressure distribution.

#### 1. 緒言

スペースプレーンや超/極超音速輸送機用推進機関としての利用が期待されるスクラムジェットエンジンの開発には、多くの技術的課題がある。その中でも、超音速流状態である燃焼器内における燃料と空気との混合が大きな問題の一つになっている。<sup>(1)(2)</sup>

著者らはこれまで、超音速流れ場における混合の構造を把握するための基礎研究として、超音速流中に流れと平行に置いた平板上のスリットおよび円孔ノズルから垂直に燃料を噴射した時の混合流れ場構造について、超音速風洞を用いた実験と数値解析を併用することで調査<sup>(3)(4)</sup>を行ってきた。

本研究は、円孔ノズルを用いた垂直噴射方式の超音速混合流れ場の3次元構造について調査を行ったものである。風洞実験により空間ピトー圧分布を測定するとともに数値解析を行い、両者を比較することで数値解析コードの3次元的な検証を行った。そして、これらを通じてより信頼性の

高い数値的予測を行うことで、実験結果と合わせて超音速流中への垂直噴流の混合流れ場構造を、一層明かなものにするを旨とした。

#### 2. 数値解析手法

数値解析は、高亜音速から超音速までに対応した3次元圧縮性熱流動解析コードA I K O F 3<sup>(5)</sup>を用いて行った。支配方程式は、時間平均化された3次元圧縮性流れに対する質量、運動量、エネルギーに関する保存式である。一般曲線座標系 $(\xi, \eta, \zeta)$ に対しては、Navier-Stokes方程式は以下の様になる。

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} \right)$$

差分スキームは、対流項はYee-HartenのTV D法<sup>(6)</sup>を用いて、粘性項は中心差分を用いることで、陰的に差分化した。時間差分は局所時間進行法を用いた。また、渦粘性 $\mu_t$ を計算するためにBaldwin-Lomaxの乱流モデル<sup>(7)</sup>を用いて、モデル化を行っている。

境界条件は、壁面についてはすべりなし条件で

\* 石川島播磨重工業株式会社

\*\* 九州大学 航空工学教室

\*\*\* 航空宇宙技術研究所

圧力勾配，温度勾配とも零にした。流入条件は実験より観察された乱流境界層厚さを用いた。噴出孔における境界条件は対応する実験条件の値を設定した。

また，実験では主流に空気，噴流には窒素を用いているので，計算では両者は同一気体であるとみなし，比熱比は一定とした。

### 3. ピトー圧空間分布測定実験

実験には九州大学航空工学科の 150×150 mm の正方形断面測定部を有する超音速風洞を用いた。(5)この風洞のスペックは，マッハ数約 4，気流持続時間が約 120秒である。

測定断面中央に，直径 5 mm の燃料噴射孔を持つ平板を固定し，超音速の主流中（空気）に，この噴射孔より音速の噴流（窒素）を噴射させた。過去に，平板上の壁面静圧分布の測定とシュリーレン写真撮影による可視化を行ってきた。(5)

ピトー圧分布の測定は，ピトー管をトラバースさせて，平板壁面から高さ 3~20mm の範囲を 1mm 間隔で測定した。実験装置構成を図 1 に，x-y 平面内におけるピトー圧測定位置を座標系と

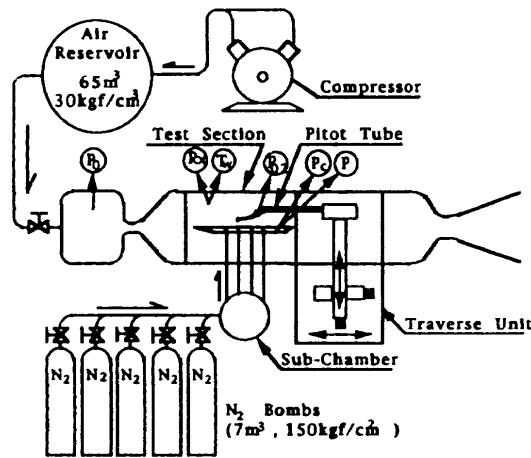


図 1. 実験装置構成図

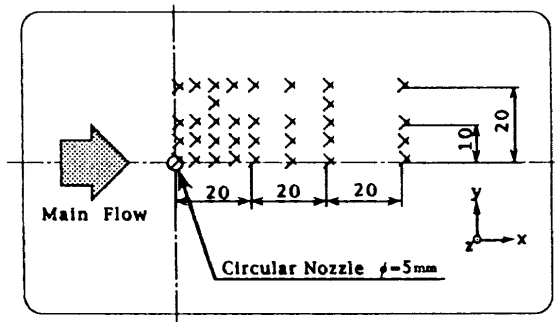


図 2. ピトー圧力測定位置

ともに図 2 にそれぞれ示す。主流流れ方向が x，横断方向が y，高さ方向が z である。実験条件は表 1 に示すとおりで，噴射圧/全圧を 0.31, 0.46 の二通りについて行った。レイノルズ数  $Re$  は平板先端から噴口中心までの距離 (300 mm) を代表長さとして定義した。

表.1 実験条件

ケース	$M_0$	$P_0$	$T_0$	$M_j$	$P_c/P_0$	$T_c$	$d$	$Re$
1	3.85	1.22	297	1.00	0.31	297	5.0	$1.0 \times 10^7$
2	↑	↑	↑	↑	0.46	↑	↑	↑

本実験で撮影したシュリーレン写真の例（ケース 2）を，図 3 に示す。図中で右から弧を描いている影がピトー管である。これより，ピトー管が流れ場に与える影響は小さいことが分かる。

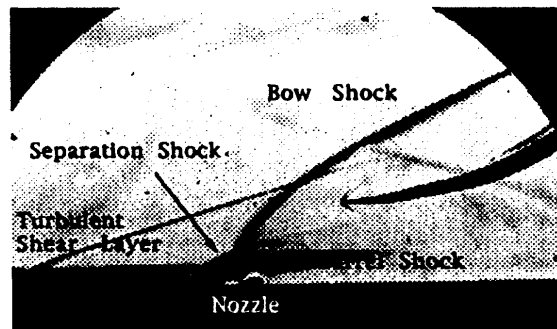


図 3. シュリーレン写真例 (ケース 2)

### 4. 実験および数値解析の結果と考察

#### 4.1 実験および数値解析結果の比較

超音速流れ場の混合構造を解明するための 3 次元圧縮性熱流動解析コードの開発を行ってきたが，空間的な構造に対する定量的な検証を行うため，新たにピトー圧力の空間分布について実験結果との比較を行った。

計算領域および格子を図 4 に示す。計算領域は噴口中心を通る x-z 面について対称性を仮定し，この対称面から片側のみを，62×32×50 の格子点で形成した。また，ノズルは 7×4 点で近似した。図中に計算領域の寸法 (mm) を併せて示した。

まず第一段階として，フローパターンおよび壁面静圧  $P_w$  の分布を比較した。数値解析結果のフローパターンの観察にはマッハ数分布を用いた。これを図 5 に示す。表示した面は，噴口中心近傍断面と底面近傍の面 ( $z = 0.5 \text{ mm}$ ) および流出境界面である。また壁面静圧分布を実験結果と比較した

もの（ケース2のみ）を図6に示す。線は解析結果，点は実験結果をそれぞれ示している。まずフローパターンを見ると，マッハ数分布は，シュリーレン写真（図3）で観察された衝撃波形状と比較して，良く一致している。また，静圧分布についてもケース1，2とも定量的に概ね一致した。

次に，3次元構造に関して，ピトー圧  $P_{02}$  の空間分布を実験と比較した結果を図7に示す。計算値は，主流全圧  $P_0$  で無次元化した後に，実験におけるピトー管の測定方向と流れ方向の違いを考慮して，速度ベクトルに対する流れ方向の余弦をとることで近似的に補正した。両者を比較すると，噴口近傍ではかなりの不一致が見られるが，これは，この領域ではピトー管の向きと流れの方向の違いが大きいこと，またピトー管により生ずる衝撃波とバレルショック，マッハディスク等との干渉の影響，などが原因として考えられる。また，計算結果の分布は実験と比べてやや拡散的になる傾向が見られたが，これは乱流モデルの影響により，乱流粘性を過大に評価したため，と推測される。しかし，これらの点を除いては，下流に行くにしたがい計算と実験は良く一致するようになる。

以上の観察から，本研究で用いた流れ解析コードは，超音速混合流れ場の三次元構造に対してあ

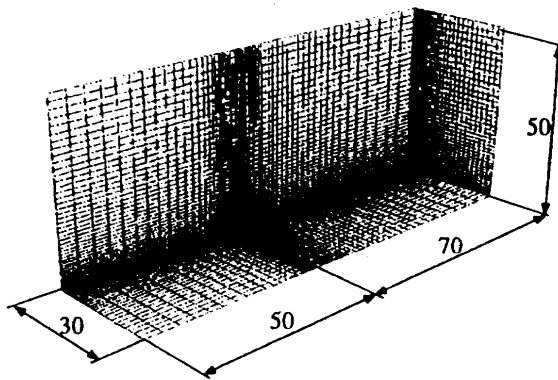


図4. 数値解析用計算格子



図5. マッハ数分布解析結果（ケース2）

る程度の予測が可能であり，数値解析結果は定量的にも実験結果と良く対応していることが分かった。

#### 4.2 混合流れ場構造の考察

本研究の数値解析結果は，流れ場の3次元構造を良くシミュレートしているので，この結果から混合流れ場の構造に関する考察を試みた。図8に，トレーサを流してフローパターンを観察した結果を示す。さらに，得られた速度場を利用して，噴出流体の濃度分布を求めた結果を図9，10に示す。図10は主流に対する横断面における分布である。これらは質量のないトレーサを噴出流に混入させて求めたものである。

トレーサを用いた可視化の結果を見てみると，噴流内へ主流空気を取り込まれていく様子がはっきりと観察された。噴流の両わき後方に主流と噴流との干渉による双子渦が生じ，それによって横に回り込んだ主流が螺旋状の軌道を描いて，底面付近を巻くように流れて噴流の下側からその内部に取り込まれていくのが分かる。その一方で，噴流に正面から向かった主流空気は，急激に曲げられた噴流の表面を滑るようにして流れ，この部分では混合はほとんど行われていないことが分かる。

次に，濃度分布を見てみると，噴出流体はある高さ以上には到達できないこと，双子渦により形成されたと思える二つの濃度ピーク部分が存在すること，この濃度ピークは下流に行くにつれて薄くなっていくこと，などが観察される。また，双子渦内への主流空気を取り込みは，剥離ショック下方の循環領域から始まっているようである。

以上の観察から，今回の流れ場における主流と噴出流の混合は，大規模渦構造による乱流混合的な挙動に大きく支配されるのではないかと推測さ

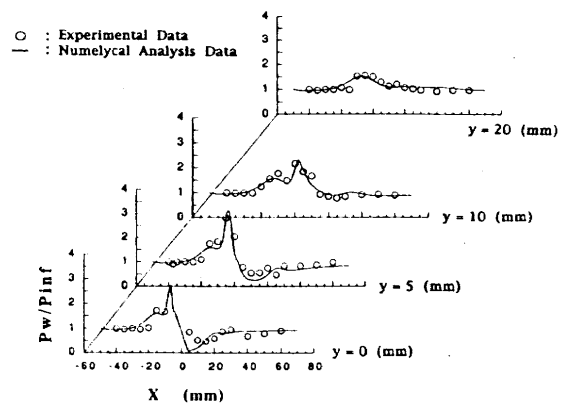


図6. 平板上壁面静圧分布（ケース2）

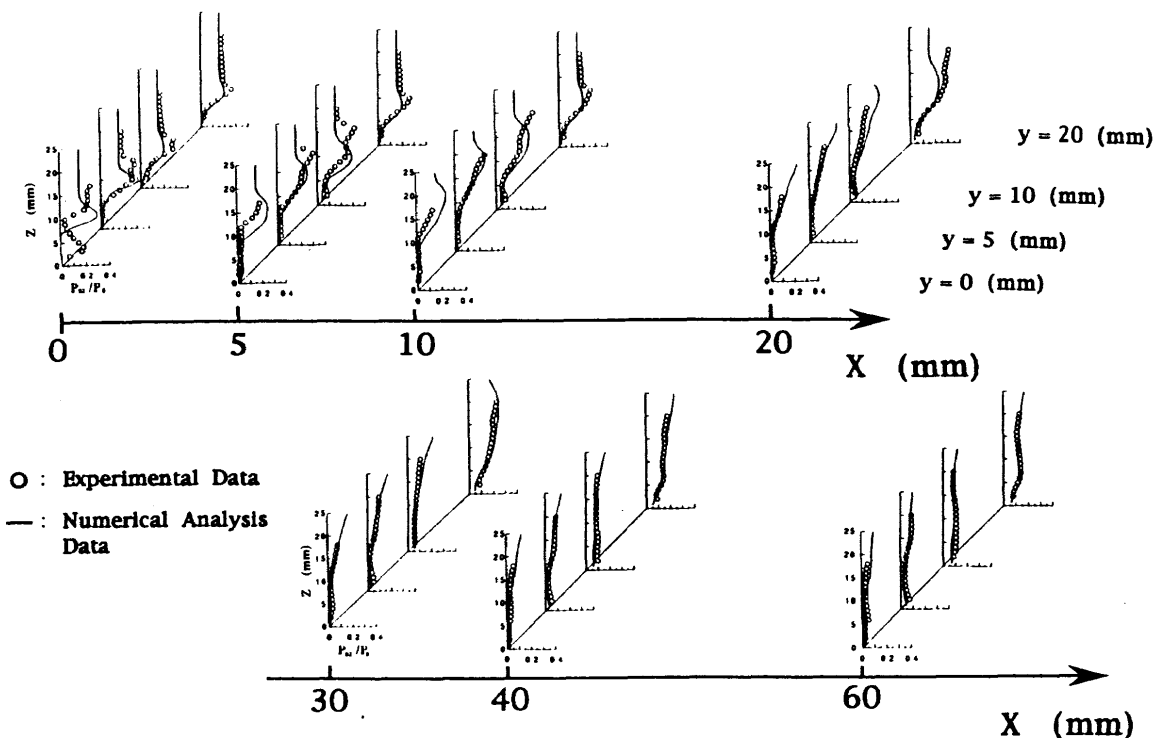


図7. ピトー圧力空間分布 (ケース2)

れる。しかし、超音速領域では乱流混合層の発達  
が抑制されるため、混合は十分行われていない。  
混合を向上させるには、流れ場中に積極的に渦を  
発生させて乱流混合を高める必要がある。このよ  
うな、積極的に混合を促進させる手法について  
は、最近さかんに研究<sup>(1)(2)</sup>が行われており、当方  
でも今後さらに、この超音速流れ場の混合促進法  
について、研究を進める予定である。

4.3 ピトー圧力の空間分布

ピトー圧の空間分布が混合流れ場に関して与え  
る情報について考察した。まず、図7において噴  
口付近でピトー圧力がピークをとる位置は、バウ  
ショックの位置と対応していることが観察され  
た。一方、濃度分布との関連については、今回  
の実験が噴出流と主流の全圧比が0.46であること  
から、濃度の高い領域ではピトー圧力は低めにな  
るものと推測された。ピトー圧と濃度の分布を重  
ねて比較したものが図11である。これを見ると、  
濃度の高い領域においては圧力は低めになってお  
り、ピトー圧分布は混合場に関してある程度の情  
報を与えるものと思われる。しかしこれは、条件  
により変化するため、普遍的な特徴としては有効  
ではない。また今回は、主流と噴出流のガス分子  
量がほぼ等しいものであったため、特徴が捉えに

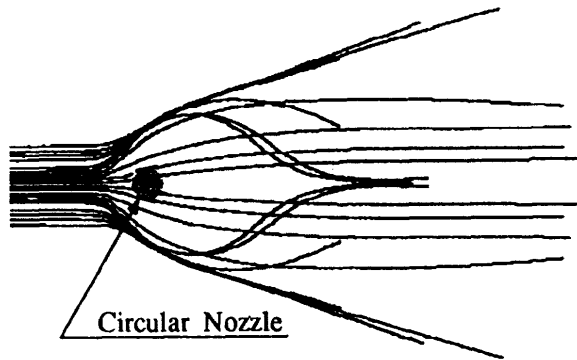


図8(a). パーティクルパス解析結果 (ケース2)  
平面図

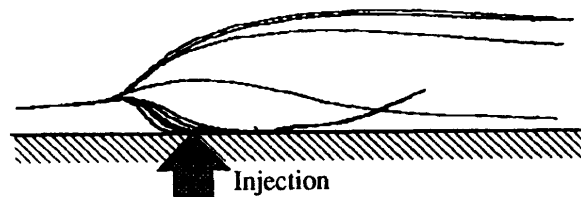


図8(b). パーティクルパス解析結果 (ケース2)  
側面図

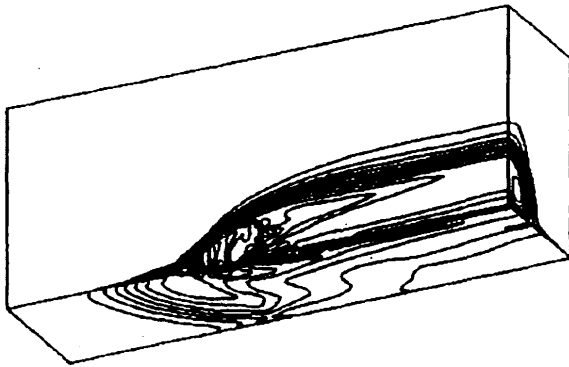


図9. 噴出流体の濃度分布解析結果 (ケース2)

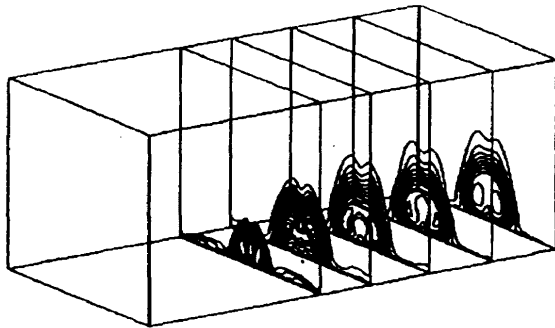


図10. 噴出流体の垂直断面濃度分布の解析結果 (ケース2)

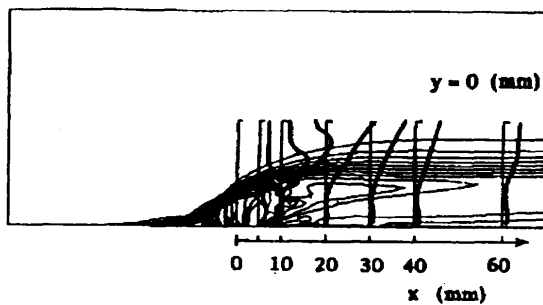


図11(a). 濃度分布解析結果とピトー圧力解析結果の比較(a) (ケース2)

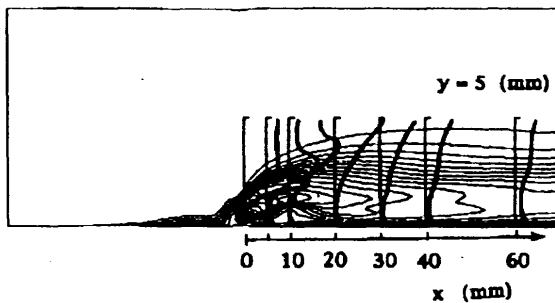


図11(b). 濃度分布解析結果とピトー圧力解析結果の比較(b) (ケース2)

くかった面もある。今後は、実際の燃料と条件が近いHeなどの密度の低いガスを用いて測定を行い、検討する必要がある。

ピトー圧の分布は、衝撃波の存在や圧力損失などの流れ場の状況を知る手段としては使えるが、混合場を調査する手段としては、今のところ大まかな混合特性が推測されるのみで、今後さらに検討が必要と思われる。

## 5. 結論

超音速流中の空力混合の基礎研究の一環として開発中である、超音速流れ解析コードを用いて、混合流れ場の3次元構造について考察を行った。一方、超音速風洞を用いてピトー圧の空間分布を測定し、現象観察からの流れ場構造の調査および数値解析コードの検証を行った。その結果、衝撃波の不連続面においてやや拡散的になるものの、本コードを用いれば、超音速流れ場の3次元構造の解析において定性的に良く、定量的にも概ね一致する予測が可能であることが確認された。

今回対象とした流れ場における混合は、大規模渦構造による乱流混合作用に支配されることが推定された。また、ピトー圧を測定することで、燃料濃度の高い領域の位置がある程度推測できる、ということがわかった。

今後、より高次の乱流モデルの導入、精度向上等により、超音速/極超音速輸送機用推進システムの開発に適用できるCFDコードの開発をさらに進める予定である。

### 【参考文献】

- (1) D.O.Davisら, 2名, AIAA Paper No.91-2264, (1991-6)
- (2) S.D.Holloら, 3名, AIAA Paper No.92-0093, (1992-1)
- (3) I.A.Waitzら, 3名, AIAA Paper No.92-0625, (1992-1)
- (4) 安藤ら, 7名, 石川島播磨技報, 31巻, 1号, (1992-1)
- (5) S.Asoら, 4名, AIAA Paper No.93-0489(1993-1)
- (6) H.C.Yeeら, 2名, AIAA Paper No.85-1513 1985
- (7) B.S.Baldwinら, 2名, AIAA Paper No.78-0257, (1978-1)

