圧縮性せん断層内に形成される縦渦構造を用いた混合促進に関する研究
－キャビティ流が混合に与える影響－

日大生産工（院）　○梅原　美友　　東大工　津江　光洋　日大生産工　野村　浩司
東大工　河野　通方　日大生産工　氏家　康成

1　序論

現在，次世代の宇宙往還機用推進機関としてスクラムジェットエンジンに注目が集まっている．スクラムジェットエンジンの実用化を阻む技術的な問題として，超音速空気流と燃料流との混合の問題が挙げられる．圧縮性の影響が顕著になるにつれて，擾乱の成長は著しく抑制され，乱流混合は極めて抑制される．この結果，燃焼効率は下がり，エンジンの性能低下を招く．したがってスクラムジェットエンジン開発においては，超音速空気流と燃料流の乱流混合の促進が重要な鍵となる．本研究の課題もここにある．

三次元的な渦構造は上記のような圧縮性の影響を受けにくいということが過去の研究で示唆されている[1]．渦構造は効率良く流体粒子の移動が行われ，流体の混合促進に適していることが知られている．本研究では三次元的渦構造の中でも流れ方向に軸を持つ縦渦構造に着目する．対象とする流れ場は曲率を持つせん断流れ場であり，超音速流と亜音速流が出会うことで形成される，二流体の混合領域である圧縮性せん断層（超音速せん断層），その内部に形成される縦渦構造および混合効果について実験的に調査を行う．

超音速空気流と亜音速流の乱流混合の促進法としては，現在までにキャビティ振動流を用いたもの[2]や，ストラットを用いた縦渦構造の導入[3]，任意に圧縮波および膨張波を発生させて乱流エネルギーを増加させる手法[4]など，種々の解析的・実験的研究がなされている．しかし，同一条件下で異なるアプローチによる実験結果を比較したデータは少ない．そこで本研究ではキャビティによる実験も行い，両者の比較検討も行う．

本報告では，キャビティを用いた実験結果について報告する．

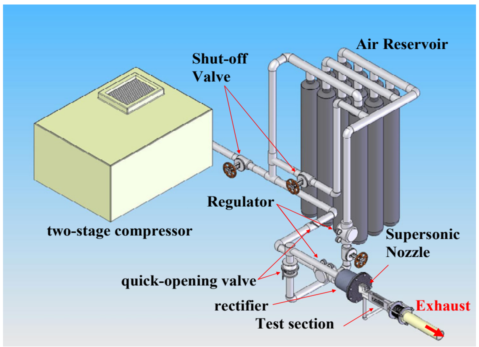


Fig.1 Supersonic wind tunnel

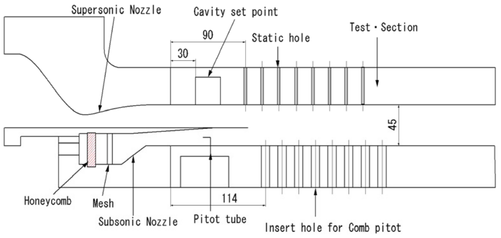


Fig.2 Schematic of test section

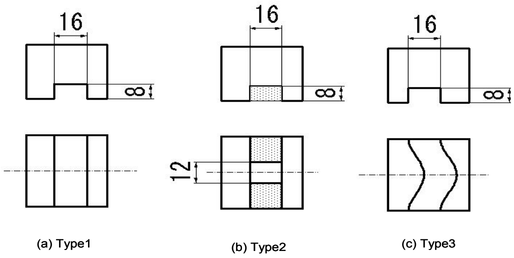


Fig.3 Cavity

2　実験装置

2.1 超音速風洞

本研究で使用する超音速風洞は，圧縮機によって貯気槽に充填された高圧空気を集合洞，ノズル，測定部，ディフューザーを通して大気へ放出する吹き出し式風洞を採用した．概略図を図１に示す．本研究では集合洞は整流筒として，流れを整流する役目

A Study on Mixing Enhancement using Streamwise Vortex generated in a Compressible Shear Layer
－　Effect of Cavity Flow on the Mixing　－

Yoshitomo UMEHARA, Mitsuhiro TSUE, Hiroshi NOMURA,
Michikata KONO and Yasushige UJIIE

もある．タンク内に充填された空気は主流，二次流それぞれの調圧弁，遮断弁，急開閉弁を通り，主流は整流筒で整流された後，図 2 に示すような超音速ノズルで超音速（M1=2.0）まで加速され，測定部であるテスト・セクションへと導かれる．二次流はノズル内で整流された後，亜音速ノズルで加速され（M2=0.29），ディフューザー，排気管を通って屋外へと排気される．整流筒内部にはメッシュ，ハニカムが設置されており，整流されると同時に混入物を取り除く．整流筒出口部分にはピトー管と静圧管が取り付けてあり，超音速ノズル入り口のピトー圧と静圧を測定する．超音速ノズルは仕切り板により上下に分割されており，片ノズルとなっている．上部が超音速ノズルとして機能する．下部は二次流用の亜音速ノズルであり，メッシュとハニカムが取り付けてある．これにより，二次流の整流と混入物の除去を行う．超音速ノズルの設計作動条件は出口マッハ数 2.0，全圧 0.5MPa，全温 288K である．主流出口は高さ 25mm，幅 40mm である．二次流出口は高さ 19.5mm，幅 40mm である．テスト・セクションはアルミニウム製である．流れ方向を x，高さ方向を y，スパン方向（幅方向）を z ととし，流路として x×y×z=390×45×40mm を確保した. 上部には静圧孔を，上流側から 90mm の位置より 20mm 間隔で８個を配した．側面部には石英ガラス窓（200×70×10mm）が配置されている．下部には圧力分布測定に使用するピトー管を差し込むための挿入孔を，上流側から 114mm の位置より 20mm 間隔で 8 個設けた．また上流側には二次流のピトー圧，静圧測定用のピトー管と静圧孔が配されている．キャビティを使用しての実験を行う際は，新たに製作した専用のテスト・セクションを使用する．キャビティ専用テスト・セクションにはキャビティ取り付け部として，x=30 の位置より x×y×z=30×30×40mm の空洞を用意した．通常のテスト・セクションと同様に静圧孔を配してある．ノズルやテスト・セクション，キャビティなどの各部品には取り付けの際に生じる，取り付け誤差を小さくするためにノックピンを設けた．また，気密を保つためにシールを施した．主流および二次流の流れの条件を，表 1 に示す．

2.2 キャビティ

本実験では三種類の形状の異なるキャビティを用意した．図 3 に本研究で使用したキャビティの概略図を示す．矩形断面のものをタイプ 1，中心部のみ幅 12mm の穴となっているものをタイプ 2，波型のものをタイプ 3 とした．L/D（キャビティ長さ L と深さ D との比）は全てのキャビティで 2.0 とした．キャビティにはキャビティ振動流による効果と，圧縮波や膨張波の発生による乱流エネルギーの増加に起因する，せん断層の成長促進効果が期待できる．図 2 に示すように本実験で使用する風洞の試験区間となるテスト・セクション上部に空洞が設けられており，各種キャビティを取り付け可能となっている．

Table.1 Flow-filed parameter

(a) Supersonic flow

Total pressure : P_{01} [MPa]	0.42
Static pressure : P_1 [MPa]	0.061
Total temperature : T_{01} [K]	288.0
Static temperature : T_1 [K]	165.7
Density : ρ_1 [kg/m^3]	1.26
Sonic velocity : a_1 [m/s]	258
Cross-section : A_1[mm^2]	1000
Mass flow rate : G_1 [kg/s]	0.62
Velocity : u_1 [m/s]	495
Mach number : M_1	1.92

(b) Subsonic flow

Total pressure : P_{02} [MPa]	0.066
Static pressure : P_2 [MPa]	0.065
Total temperature : T_{02} [K]	288.0
Static temperature : T_2 [K]	286.0
Density : ρ_2 [kg/m^3]	0.80
Sonic velocity : a_2 [m/s]	339.0
Cross-section : A_2 [mm^2]	800
Mass flow rate : G_2 [kg/s]	0.039
Velocity : u_2 [m/s]	61.2
Mach number : M_2	0.18

2.3 計測系

本研究では 2 流体の混合領域である超音速せん断層厚さの成長率によって混合促進効果を評価する．せん断層厚さは流れ場のピトー圧分布より見積もる．ピトー圧分布の測定には櫛型ピトー管を用いる．ピトー管は，ナイロン・チューブを介して，圧力セン

サにつながっている．圧力センサには半導体圧力センサを用いた．オフセットを安定に保つため，全てのセンサを 1 つの箱の中に納めた．圧力は電気信号に変換され，A/D ボードを介してパーソナル・コンピュータに取り込まれる．櫛形ピトー管は，y-z 軸微動装置に取り付けられている．y-z 軸微動装置は，パーソナル・コンピュータで制御されたステッピング・モータにより駆動される．プログラムにより，y-z 軸微動装置の微動，圧力データの取り込みを自動的に行う．高速流は低速流と比較し，運動量が大きい．このため，高速流の領域ではピトー圧が大きくあらわれる．逆に，低速流は高速流と比較し，運動量が小さい．このため，低速流の領域ではピトー圧が小さくあらわれる．高速流と低速流にはさまれた，ピトー圧が変化していく領域がせん断層に対応する．本研究においては，実験により得られたピトー圧の最大値と最小値の差を求め，その 90%および 10%となる位置をそれぞれ y+，y-とする．y+と y-の差を，この z 方向位置におけるピトー圧分布によるせん断層厚さ δ とする．

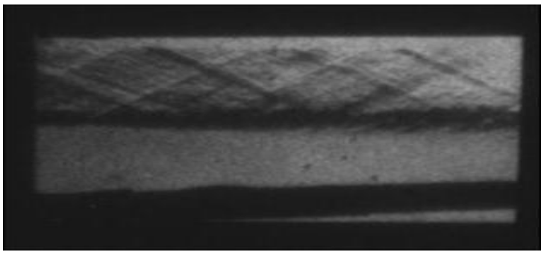
$$\delta = y^{+} - y^{-}$$

ピトー圧測定によって得られたデータを横軸 y と縦軸ピトー圧にプロットする．それぞれの測定位置におけるグラフの形状を双曲線正接関数で，

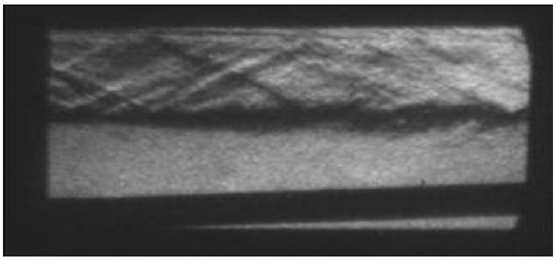
$$P = P_2 + \frac{P_1 - P_2}{2}\left(1 + \tanh\frac{y-a}{b}\right)$$

と近似し，最小二乗法を用いて変数 a，b，最高圧力 P1，最低圧力 P2 を求める．これによって求められた式からピトー圧の 90%と 10%となる位置 y+，y-を数値的に計算し，その差を求め，せん断層厚さを見積もる．各測定点におけるせん断層厚さをグラフ化し，最小二乗法によって線形化することで，直線の傾き，すなわちせん断層の成長率を算出する．

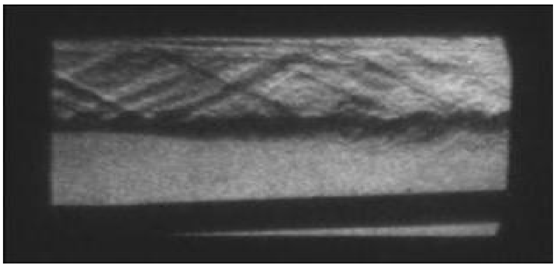
流れ場のせん断層の挙動，圧縮波や膨張波の観察のため，流れ場の可視化法としてシュリーレン法を用いた．一度に可視化できる範囲は，光学系の制約上 100mm 程度である．光源には輝度が高く,むらの少なさ,点光源に近いことなどの理由からアーク放電により連続発光するキセノン・ランプを用いた．撮影には イメージ・インテンシファイア内蔵 CCD カメラ(PCO 製, DiCAM2)を用いた．撮影された映像を光ケーブルに出力しパーソナル・コンピュータに記録した．実験では，イメージ・インテンシファイアのゲート時間を，連続シュリーレン像を撮影する場合には 100μsec，瞬間シュリーレン像を撮影する場合には 100nsec に設定した．



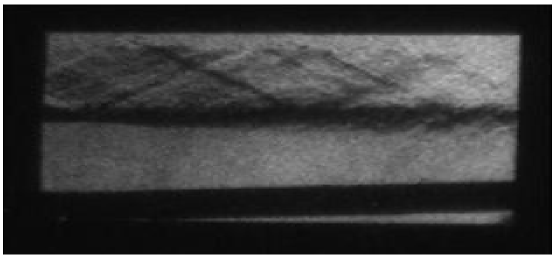
(a) Non Cavity



(b) Type1



(c) Type2



(d) Type3

Fig.4 Typical schlieren images of Shear layer

3 実験結果および考察

図 4 に本実験で得られた流れ場の瞬間像を示す．図 4 (a) はいずれのキャビティも使用していない場合の瞬間像となっている．図 4 (b)，図 4 (c)，図 4 (d) はキャビティのタイプ 1，タイプ 2，タイプ 3 を使用した場合に対応した瞬間像である．いずれの場合も超音速せん断層と圧縮波や膨張波の存在が確認できた．このことから流れ場が超音速流れである

ことは自明である．キャビティを使用した場合は，使用していない場合と比べて多数の圧縮波と膨張波が発生していることが観察できる．また，上部にはキャビティ流の特徴である剥離せん断層の存在が確認できた．本研究では移流マッハ数を高くするために低速流である二次流の流速を低めに設定している．そのため，流量が小さくなり，コアンダ効果によってせん断層は測定部下面に向かって湾曲する．測定部下面に傾斜が設けられているのは，二次流を押し上げることでコアンダ効果を防ぎ，せん断層を平行に保つためである．また，二次流は亜音速領域であるため，下流からの擾乱の伝播によりせん断層の上下方向の振動を誘発することが確認された．測定部下面の傾斜は，下流の流路を狭めて擾乱の伝播の防ぐ役割も担っている．この結果，流れ場を準定常状態に保つことが出来た．チョーク現象，およびせん断層の振動を引き起こさない最適なランプ高さと傾斜角度は，それぞれ 13.4mm，1.52deg であった．また，流れ場の移流マッハ数は 0.73 であった．移流マッハ数の値が 0.6 を上回ると圧縮性の影響は顕著となることが知られている．本風洞は，圧縮性の影響が顕著なせん断流れを目的としているので，この値は満足できるものであった．

図 4 においてキャビティを使用しない場合，せん断層は直線的であるのに対して，キャビティを使用した場合ではせん断層の波打ちが観察できた．これはせん断層の乱れの増幅による縦渦の誘起によるものと思われる．シュリーレン法は流れ場の密度勾配による光路のずれを明暗の影として検出することで，検査対象物の密度分布を観察する可視化法であり，光路に沿う積分情報となる．密度変化の激しいせん断層は縦渦構造が誘起されることで生じる，y-z 平面における山や谷が存在していても，シュリーレン法では観察することは極めて難しい．そのため，ミー散乱法のようなトレーサ粒子を用いた可視化法での y-z 平面の観察が必要であると考えられる．

図 5 に本実験で得られた，z=0mm におけるせん断層厚さの推移を示す．横軸を測定位置 x（mm），縦軸をせん断層厚さσ（mm）とした．測定位置は主流と二次流を隔てる仕切り板の終端を 0mm とした．グラフを線形近似し，せん断層の成長率を算出するとせん断層の成長率はキャビティを使用していない場合は 0.0424，タイプ 1 を使用した場合は 0.0544，タイプ 2 の場合は 0.06630，タイプ 3 の場合は 0.0469 となり，タイプ 2 を使用した場合が最も高い増幅率を得られた．キャビティを使用した場合，その形状に関わらずせん断層厚さの成長率はキャビティを使用していない場合に比べて増加傾向にある．しかしながら，上述したようにこの結果は z=0mm におけるものである．タイプ 2 やタイプ 3 のようなスパン方向（z 方向）に変化を有している形状の場合，y-z 平面での s せん断層厚さの変化など，スパン方向にも何らかの影響を与えている可能性が考えられる．そのため，スパン方向においても複数点でのせん断層厚さを見積もることで 3 次元的な評価が必要であると考えられる．

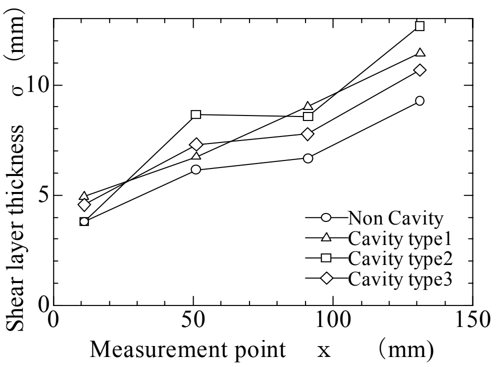


Fig. 5 Shear layer thickness

4 結論

形状の異なる三種のキャビティを用いて超音速混合実験を行った結果，以下の知見を得た．

1. テスト・セクション下面に傾斜を設けることにより，準定常な流れ場を得ることができた．その際の傾斜部分終端の最低高さは 13.4mm であり，最低角度は 1.52deg であった．
2. 三種類の形状の異なるキャビティを用いて実験を行った結果，全てのキャビティで混合促進効果を確認できた．
3. せん断層の成長率が最も増大したのはキャビティタイプ 2 を用いた場合で，せん断層の成長率は 0.06630 であった．

「参考文献」

1) Araki, M. et al, Proc., ISABE (2001), CD-ROM
2)浅井 智広・西岡 通男，ながれ 22: 131-145 (2003)
3)須浪 徹治・Michael WENDT・西岡 通男・村上 淳郎・工藤 賢司，日本航空宇宙学会論文集 Vol.50 pp.135, No.579 APR 135 (2002)
4)Ji-Ho Kim, et al, AIAA Journal vol.41,No6 (2003)