

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 — 実験装置の設計と試験 —

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
東大新 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⁾．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．

流れ場を再現するための実験装置として超音速風洞を製作した．本報告では一連の風洞始動実験について報告する．

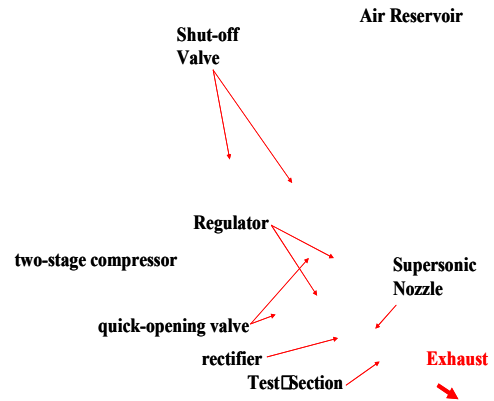


Fig.1-1 Supersonic wind tunnel

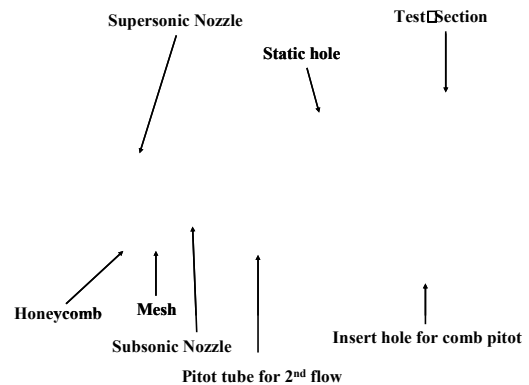


Fig.1-2 Test · section

2 実験装置および方法

2.1 風洞設備

超音速流れの実験には超音速風洞が必要不可欠である．本研究で使用する超音速風洞

A Study on Mixing Enhancement Streamwise Vortex in A Compressible Shear Layer — System Planning and Testing for Experimental Apparatus —

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

は東京大学工学部本郷キャンパスの風洞室内に設置した。超音速風洞には、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。図1-1に概略図を示す。本研究では集合洞は整流筒として、流れを整流する役目もある。圧縮機は二段のピストン・スクリュ複合圧縮機を使用し、超音速流である主流用に8本、燃料流である二次流用に4本の計12本の高圧タンクに空気を充填する。高圧タンクは同室内の燃焼用風洞に使用しているものを使用する。圧縮機はタンク内の圧力が4.4MPaになった時点で自動停止する。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、超音速ノズルで超音速 ($M_1=2.0$) 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 ($M_2=0.29$)、ディフューザー、排気管を通し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られてあり、超音速ノズル入り口のピトー圧と静圧を測定する。超音速ノズルは鉄製である。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られている。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。測定部となるテスト・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

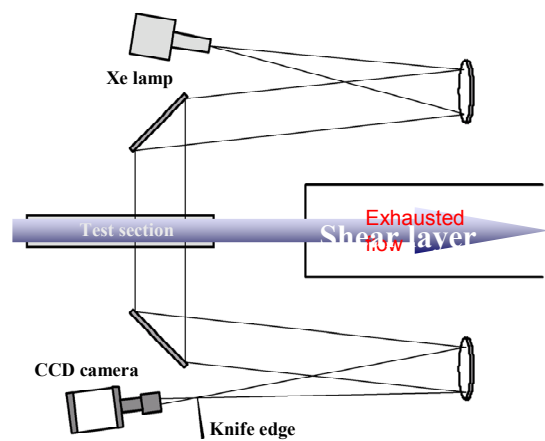


Fig.2 Schematic of optical setup for schlieren method.

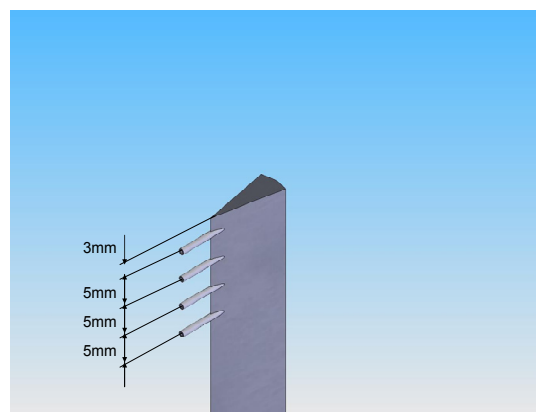


Fig.3 Comb Pitot tube

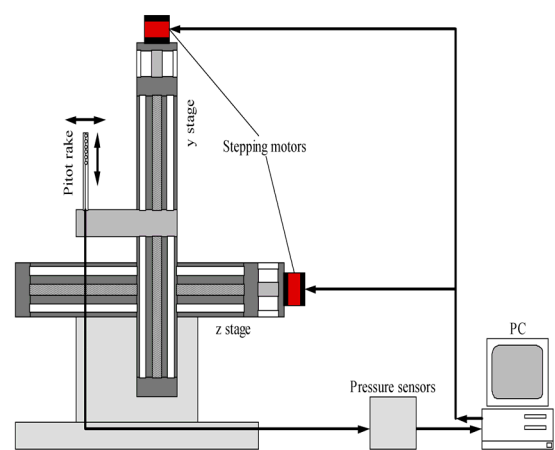


Fig.4 Schematic of Pitot rake traverse and data acquiring system.

パン方向（幅方向）を z とし、流路として $x \times y \times z = 390 \times 45 \times 40 \text{mm}$ を確保した。テスト・セクションは、上下左右の4個の部品で構成されている。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（ $200 \times 70 \times 10 \text{mm}$ ）が配置されている。可視化の必要のない実験の際は鉄製のフタを使用する。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管、静圧測定用のピトー管と静圧孔が配されている。ノズルやテスト・セクション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。本研究では曲率を持つ流れ場を実験対象としているが、超音速風洞の始動実験であるため、組み付けや取り外しが容易なことを考慮して、比較対象用の矩形のテスト・セクションを用いて実験を行った。

2.2 光学系

図2にシュリーレン法による流れの可視化実験における光学系の配置図を示す。光源には、連続発光のキセノン・ランプを用いた。キセノン・ランプを出た光は、凹面鏡で平行光となり、テスト・セクションに入射される。テスト・セクションを通過した平行光は凹面鏡で集光される。焦点にはナイフ・エッジが設置されている。本研究ではナイフ・エッジはハーフカットとした。撮影は、イメージ・インテシファイア内臓 CCDカメラ(PCO製, DiCAM2)で行う。

2.3 圧力測定系

本研究では測定領域でのせん断層厚さを見積もり、せん断層の成長率を算出することで混合効果を評価する。せん断層厚さはピトー管分布より見積もる。ピトー管分布の測定には楕型ピトー管を用いる。図3に、

本研究の実験で用いる楕型ピトー管の概略図を示す。一本一本のピトー管には、外径 $\phi 1.0 \text{mm}$ 、内径 $\phi 0.6 \text{mm}$ のステンレス製のパイプを用いた。ピトー管は全長10mmである。ピトー管は4本一組で楕型ピトー管を形作っており、ピトー管の間隔は4mmである。また、ピトー管をテスト・セクションに挿入する際には、ピトー管挿入孔からの空気の流入・流出が問題となる。そこで、本研究では、気密を保てるようにピトー管挿入孔にシールを施した。

図4に、ピトー管測定系（楕型ピトー管、圧力センサ、 y - z 軸微動装置、パーソナル・コンピュータ）の概略を示す。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（COPAL ELECTRONICS製, P-2000）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（Gateway製, GP6-3000）に取り込まれる。楕型ピトー管は、 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、自動的に行うことができる。

2.4 実験方法

実験は以下の手順で行われる。

- (1) 各バルブが閉まっていることを確認する。
- (2) タンク内の圧力が所定の圧力となっていることを確認後、遮断弁を全開にする。
- (3) 調圧弁により、主流、二次流ともに弁より下流の圧力が設定値で安定することを確認する。
- (4) 主流の急開弁を全開にし、流

れが超音速となった後，二次流側の急弁を全開にし，測定を開始する

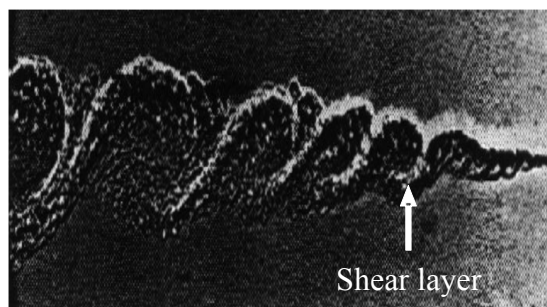
(5) 遮断弁，急開弁を閉鎖する．シュリーレン法による可視化実験を行う場合は事前に光学系の準備を行う．一回の測定時間は測定内容で異なるが，10秒から2分程度である．

3 実験結果

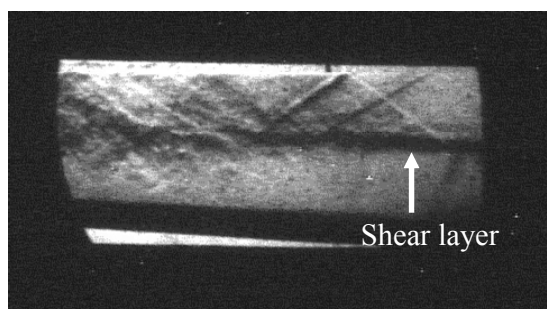
図5 (a) にBernal²⁾らによる，亜音速せん断層のシュリーレン像と本研究でのシュリーレン法による可視化実験で得られた流れの瞬間像 (b) を示す．亜音速せん断層と比較して，本研究で得られた瞬間像のせん断層は発達が著しく抑制されている．これは超音速せん断層の最も顕著な特徴である．また，せん断層より上部領域では衝撃波の発生を確認できた．これらの結果から，せん断層より上部領域が超音速であること，流れ場に超音速せん断層が形成されているのが確認できた．また，実験中にせん断層が上下に移動する不安定現象が確認された．同時に調圧弁より下流の圧力が安定せず低下していく現象も確認された．これら一連の現象の原因としては，調圧弁が正常に動作しておらず，圧力比が安定しないこと，せん断層より下部領域（亜音速流）において，下流からの擾乱の影響を受けていることが原因と考えられる．実験後，テスト・セクション，ノズル，整流筒を取り外すと，整流筒から多数の錆びた金属片のようなものと，多量の水，油が発見された．これらは高压タンク内に貯まっていたものと考えられる．調圧弁の動作不調もこれらが原因と思われる．

4 結言

超音速風洞を設計し，始動実験を行った結果，以下の知見を得た．



(a) Subsonic shear layer, Bernal et al. ²⁾



(b) Supersonic shear layer

Fig.5 Typical schlieren images of (a) subsonic and (b) supersonic shear layers

1. 本研究で使用する超音速風洞は超音速流れを再現することが可能であった．
2. 流れ場内に超音速せん断層が形成されることが確認できた．
3. 調圧弁の修理，高压タンクの交換により，圧力比を安定させることができた．
4. テスト・セクション下流側に楔を設置することでせん断層の挙動が安定した．

「参考文献」

- 1) Araki, M. et al, Proc., ISABE (2001), CD-ROM.
- 2) Bernal, L. P. et al., Streamwise Vortex Structure in Plane Mixing Layers, J. Fluid Mech., Vol. 170 (1986), pp.488-525.
- 3) 松尾一泰, 圧縮性流体, 理工学社, (1994)