

縦渦列を用いた超音速混合の制御

須 浪 徹 治* 徳 永 英 紀** 西 岡 通 男***

Control of Supersonic Mixing Using Streamwise Vortices

Tetsuji SUNAMI *National Aerospace Laboratory, Kakuda Centre*

Hidenori TOKUNAGA *KHI*

Michio NISHIOKA *Dep. Aero Space. Eng. Univ. of Osaka Pref.*

1. 序論

超音速混合制御技術は、スクラムジェットエンジンの超音速燃焼制御技術を達成するための重要課題となっている。それはスクラムジェットエンジン内での超音速燃焼が混合律速であり、1msec以下の短時間に燃焼水素と空気の混合・燃焼を行う必要があることによる^{1,2}。超音速では移流マッハ数 Mc が増すにつれ乱流組織渦の成長が鈍化することが知られており、混合層の成長率で見ると Mc が0.8以上では非圧縮流の0.2倍程度に低下し³⁻⁶、従って混合層の連行量・混合が抑制される。また、混合層は次第に3次元渦構造に支配されるようになる⁷。これは圧縮性の影響で横渦（非圧縮流では周知の2次元大規模渦構造）の成長が抑制され、実質的な移流マッハ数が $Mc \cdot \cos\theta$ となる斜行渦（主流に対して θ の角をなす渦）の成長がこれに卓越するようになるからである⁸。このようなことから、超音速混合を促進・制御するためには人為的な組織渦や乱流渦の導入・制御が必要となる。従来の超音速混合制御に関する研究には、バロクリニクトルク⁹、振動衝撃波¹⁰、縦渦^{11, 12, 13}、スワールジェット¹⁴の利用等がある。特に、縦渦を利用した混合は斜行渦が支配的となる圧縮性乱流の特性に合致したものである。

これまでの著者等の縦渦を用いた超音速混合制御に関する基礎研究^{15, 16, 17}では、超音速後流への縦渦の導入方法を提案し、その方法によると縦渦導入時のエネルギー

損失が極めて小さいこと、形成段階における直径の成長率は $dD_{sv}/dX=0.18\sim0.26$ であり非圧縮の場合の成長率に匹敵すること等、その有利性が示されている。その一方方法として、縦渦の回転方向を考慮してその配置を制御することにより超音速混合を制御できる可能性がある。そこで本研究¹⁸では、主流マッハ数2.45の超音速後流におけるCounter-rotation（スパン方向に交互に逆回転）とCo-rotation（同方向回転）の縦渦列について縦渦内の流れの諸量分布の下流方向変化、縦渦と剪断層やジェットとの干渉、縦渦の乱流化と混合等について観察し、超音速混合制御の観点から考察した。さらに、複葉モデルにより導入された縦渦列間の干渉についても同様の考察を行った。

2. 実験方法

実験にはマッハ数2.45の吸込式超音速風洞（測定部断面80mm×80mm）を用いた。測定部に燃料噴射ストラットに見立てたモデルを1個または2個設置し、これにより超音速後流に縦渦を導入した。モデルコード長85mmに基づく主流の単位レイノルズ数は $1.0 \times 10^6 \text{m}^{-1}$ である。モデル後流に於いてシュリーレン法による可視化、静圧・ピトー圧、熱線による質量流束 ρU の測定等を行った。これらの結果をもとに縦渦形成の様子、縦渦内の流れの諸量分布と乱流変動、縦渦断面形状およびそれらの下流方向への変化、縦渦間の干渉等を調べた。また、模擬燃料とし

* 航空宇宙技術研究所

** 川崎重工

*** 大阪府立大学工学部

てボタン蒸気のジェットをモデルから噴射し、直接撮影により縦渦とジェットの干渉の様子を観察した。

3. Counter-rotationの縦渦間の干渉

Counter-rotationの縦渦導入モデルCNR10（図1）後流のシュリーレン写真を図2に、縦渦断面のピトー圧分布の下流方向変化を図3に示す。以下に示す写真ではいずれも主流は左から右方向である。座標はモデル後縁から下流方向、モデル厚み方向、スパン方向にそれぞれ x , y , z 軸をとる。図2ではモデル後縁からの上下の剪断層と、それらの間に縦渦（幅広の明暗の縞）が観察される。縦渦の循環は文献¹⁷⁾と同様に見積もると $\Gamma=1.9\text{m}^2/\text{s}$ である。縦渦は下流に行くにつれて乱流化した剪断層を取り込み、 $x=50\text{mm}$ 付近から下流では乱流域が剪断層から縦渦中心部へ拡大していくので、強い縦渦の存在を示す明暗の鮮明な領域は狭くなり中心（ $y=0\text{mm}$ ）付近に限られるようになる。これに対応する様子は図3でも見られる。図3は2つの縦渦（回転方向は左が右回り、右が左回り）を捕らえているが、 $x=10\text{mm}$ ですでに直径約6mmのほぼ円形の縦渦

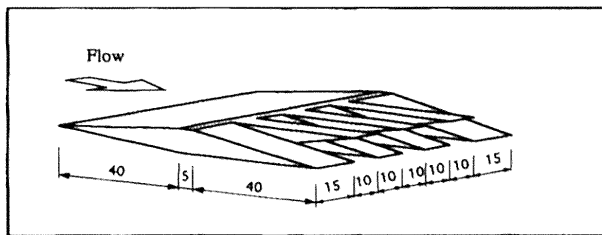


図1 モデルCNR10形状図

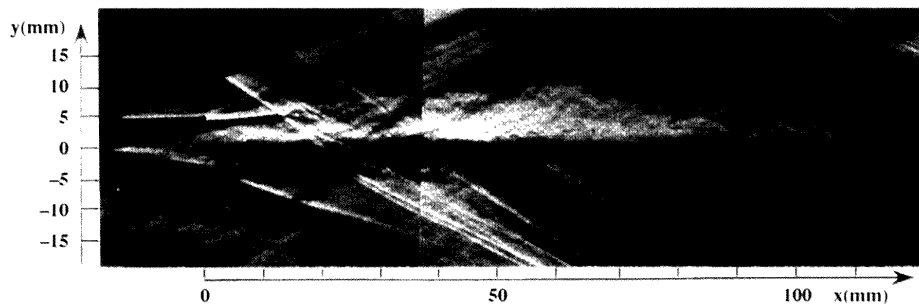


図2 CNR10後流シュリーレン写真（Counter-rotation, ナイフエッジ水平, 180nsec）

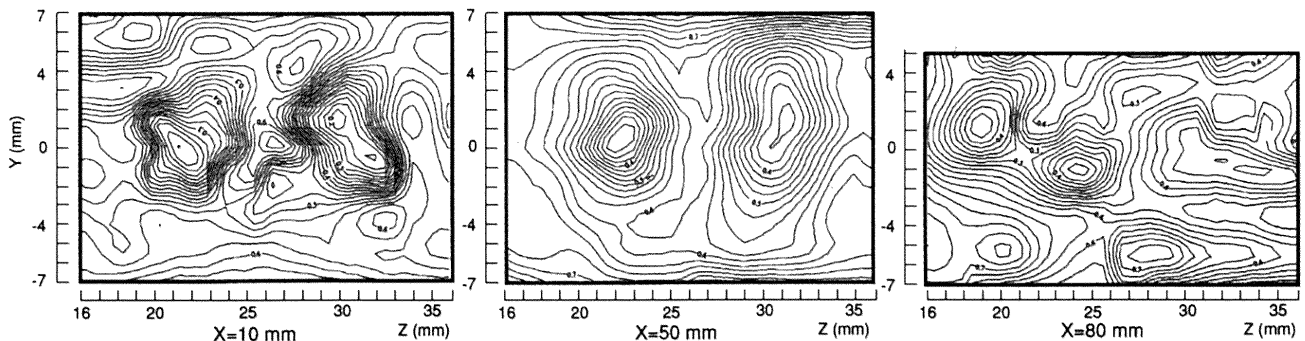


図3 CNR10縦渦断面ピトー圧分布

が形成されており、 $x=50\text{mm}$ では直径約10mmの大スケールの構造に成長した後 $x=80\text{mm}$ では小さなスケールに崩壊している。このような縦渦と剪断層の干渉は、縦渦と剪断層の相対的なスケール・強さ、乱流か層流かの状態などに強く依存すると考えられる。縦渦内（ $y=0$ ）の流れの諸量分布をピトー圧と静圧の測定値から貯気槽状態からの断熱流れを仮定して求めた結果、縦渦内では中心方向にピトー圧、マッハ数、流速、密度が減少し、静温が増加することがわかった。モデル直後の縦渦内での静温が高いことは、着火・保炎に利用できる可能性がある。 ρU 分布は $x=0\sim 20\text{mm}$ の間に急激に増加する。増加量は縦渦中心では僅かであるが中心から離れるほど大きくなり、 $x=20\text{mm}$ では縦渦の外縁部で $x=0\text{mm}$ の約2倍、 ρU を z 方向に積分して求めた質量流量は $x=0\text{mm}$ の約2.6倍であり、縦渦形成段階での連行量は大きい。 $x=20\text{mm}$ 付近から下流では縦渦内外の諸量の差は解消されていくが、特に ρU 分布が縦渦内で一様化すること、 $x=50\sim 80\text{mm}$ の縦渦内に強い衝撃波の入射が観察されない領域で縦渦内ピトー圧が上昇しかつ一様化していく様子は、縦渦内での混合が進んでいることを示す。次に、CNR10後半のスロープ部からボタン蒸気のジェットを後方へ噴射し、縦渦を可視化すると同時に縦渦とジェットの干渉の様子を観察した（図4）。図4からCounter-rotationの縦渦列を含む後流内の組織構造の一部と思われるパターン（ジェットに見られる下流方向に傾いた枝の様な構造）やジェットが縦渦による大スケールの移流拡散を受けている様子が観察される。

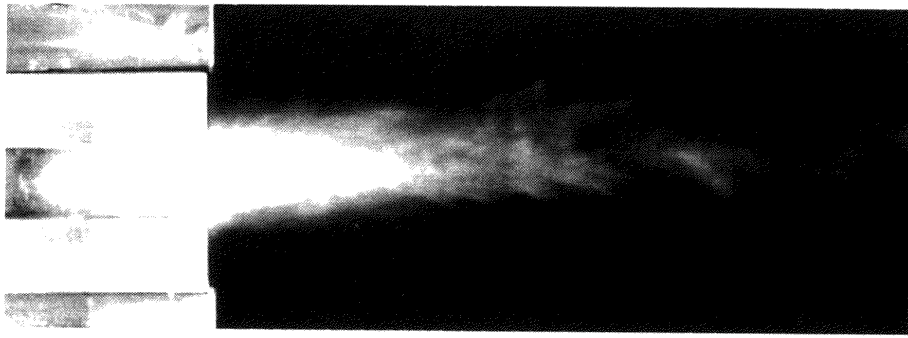


図4 Counter-rotationの縦渦列とブタンジェットの干渉

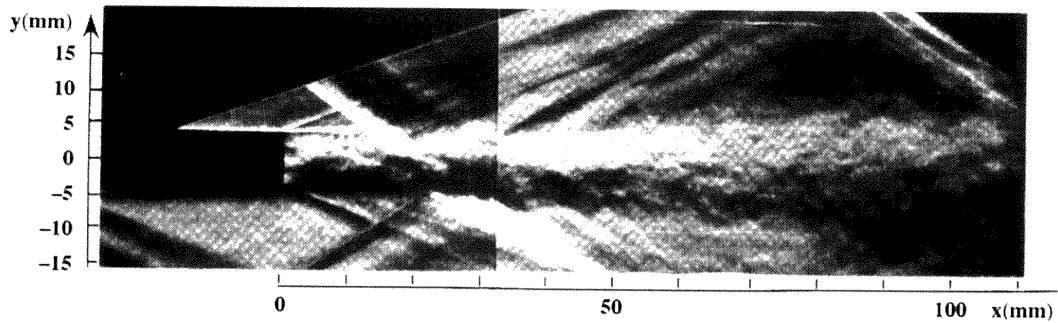


図5 COR8後流シュリーレン写真 (Co-rotation, ナイフエッジ水平, 180nsec)

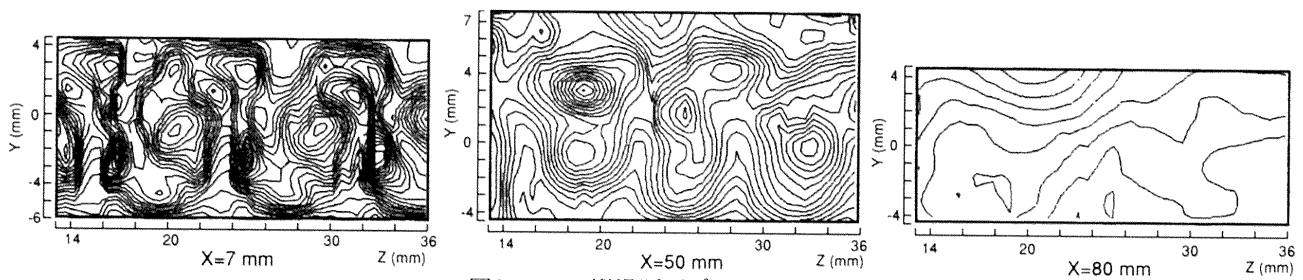


図6 COR8縦渦断面ピトー圧分布

4. Counter-rotationとCo-rotationの縦渦間干渉の比較

モデルCOR8によりCo-rotationの縦渦列を導入した。このシュリーレン写真及び断面ピトー圧を図5, 6に示す。図5を見るとCo-rotationの縦渦はCounter-rotationに比べて早期に乱流化している。さらに、縦渦の明暗のコントラストも $x=50\text{mm}$ 付近から突然弱くなり、その下流で縦渦内は小スケールの乱れで満たされているようである。図6では縦渦は剪断層を巻き込み ($x=7\text{mm}$)、 $x=50\text{mm}$ では縦渦と剪断層の区別が鮮明でなくなり、これらは一体化して縦渦全体としてのスケールを増しているようである。 $x=80\text{mm}$ ではピトー圧はほぼ一様化し、等高線も疎となっている。ピトー圧の最低値は0.55であり、Counter-rotation ($x=80\text{mm}$) の0.35に比べてかなり大きな値である。これらは $x=50\sim 80\text{mm}$ においてCOR8後流内での混合がより進んでいることを示している。以上からCounter-rotationの縦渦列はCo-rotationに比べて比較的安

定であり、かなり下流まで強い縦渦構造を維持するのに対し、Co-rotationの縦渦列は早期に乱流化し、後流内での混合を早めると言える。非圧縮の縦渦列についても同様の傾向を確認している。このような違いの原因としては、Co-rotationの縦渦が隣同士で密接するようになりその境界に混合層が生じること、そのために主流に垂直な面内でのy方向速度分布の変局点の数がCounterの場合の2倍になること、さらにCo-rotationの場合にはスパン方向(Z方向)速度変動が縦渦間の境界面に対して反対称攪乱であることなどが考えられる (Counterは対称攪乱)。定温度型熱線流速計 (応答周波数120kHz) による縦渦中心付近の ρU の変動波形を図7に示す。縦渦中心部での乱流変動の実効値は主流 ρU の約10~30%であり、強い乱れの存在を示している。

5. 複葉モデル後流の縦渦列間の干渉

CNR10と同様のモデルを2個並べ (複葉モデル) これに

より導入される縦渦列間の干渉を観察した。上下のモデルはスパン方向へのスライドが可能で、上下の縦渦配列を制御できる。実験を行った3ケースの縦渦配列のうち縦渦列間の干渉が最も顕著であった配列のシュリーレン写真と断面ピトー圧分布を図8, 9に示す。図8を見ると上下の縦渦列が干渉し、特に下側の縦渦列はかなり乱流化している。図9には剪断層を巻き込んだ4個の縦渦が捕らえられている。縦渦回転方向は左側2つが左回り、右側2つが右回りである。下流にいくにつれ縦渦の誘起場により剪断層がアーチ状に引き延ばされ、下側のモデルの剪断層が上側モデルの縦渦列に取り込まれていく様子がわかる。この断面内での縦渦の移動速度は約 100m/s と大きく、大スケールでの攪拌が起きていることを示す。このような縦渦の誘起速度による断面内での運動は、非圧縮の2次元渦の誘起場による運動に良く似ている。また、異なる縦

渦配列では上下の縦渦間の干渉は図8の場合ほど顕著でなく縦渦構造がかなり下流まで維持される様子が観察された。このように縦渦配列により下流での干渉・混合の様子が強く影響される。以上から $Counter-rotation$ や $Co-rotation$ 等の基本的な配置の縦渦列の挙動を考慮して、縦渦の循環・回転方法・スケール・配置等を制御パラメータとして渦運動・混合・燃焼の制御に利用できることが分かった。また、複数のストラットによる縦渦列で燃焼器全域における混合を実現できる可能性が示された。

6. まとめ

超音速流中の縦渦内の流れの諸量分布の下流方向変化、縦渦列間の干渉・縦渦とジェットとの干渉、縦渦内での乱流変動等が観察され、縦渦の初期配列が干渉の程度やこれによる乱流渦のスケールおよび混合の様子に大きく影響することがわかった。このことから衝撃波・剪断層・縦渦の配置の操作により、超音速の流れ場及び混合の制御、さらに燃焼・熱拡散の制御がかなり自由にできると考えられる。また、複数のストラットによる縦渦列で燃焼器内全域での混合を実現できる可能性が示された。

参考文献

- 1) A. Ferri : Ann. Rev. Fluid Mech. Vol. 5 (1973) 301-338.

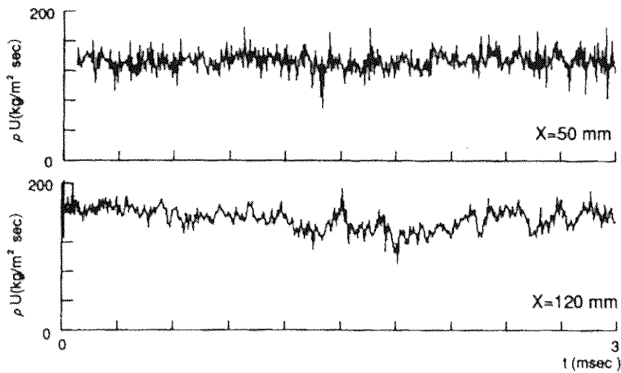


図7 COR8縦渦内 ρU 変動 ($y=0\text{mm}$)

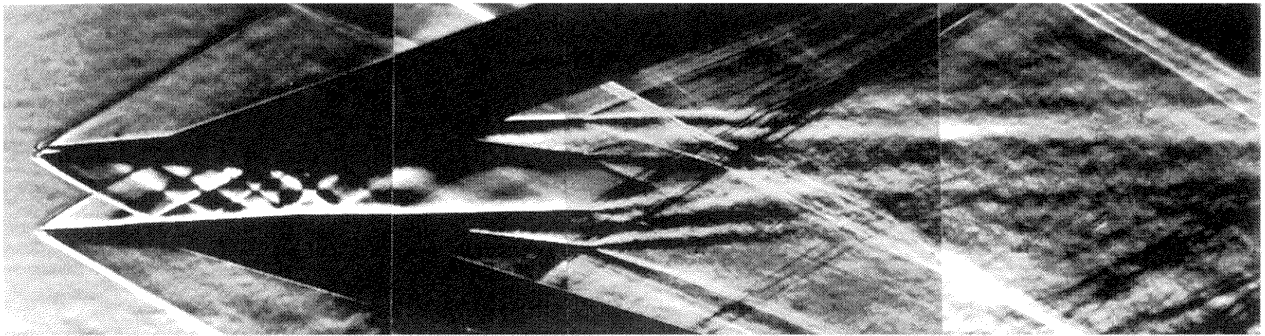


図8 複葉モデル後流シュリーレン写真 (ナイフエッジ水平, 180nsec)

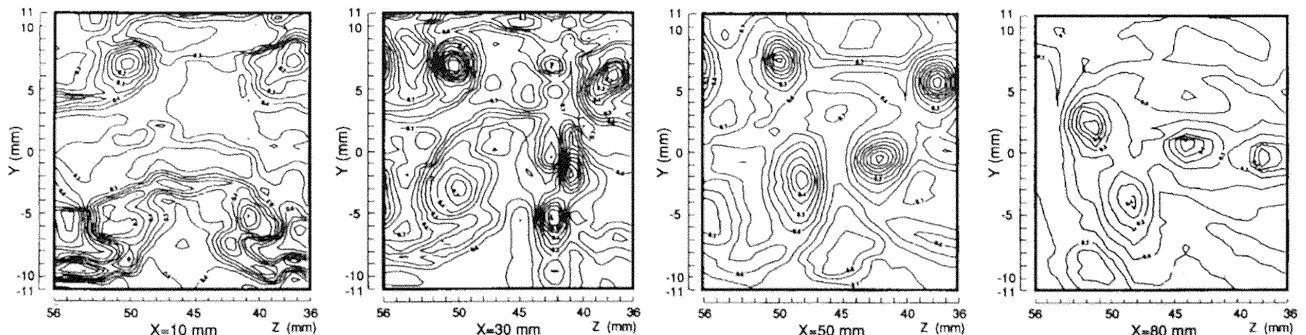


図9 複葉モデル縦渦断面ピトー圧分布

- 2) J. R. Henry and G. Y. Anderson : NASA TM X-2895 (1973).
- 3) D. W. Bogdanoff : AIAA J. 2 (1982) 926-927.
- 4) D. Papamoschou and A. Roshko : J. Fluid Mech Vol. 197 (1988) 453-477.
- 5) P. E. Dimotakis : AIAA J. 24 (1986) 1791-1796.
- 6) N. Chinzei, G. Masuya, T. Komuro, A. Murakami and K. Kudou : Phys. Fluids 29 (5) (1986) 1345-1347.
- 7) N. T. Clemens and M. G. Mungal : AIAA J. 30 (4) (1992) 973.
- 8) D. Papamoschou : AIAA Paper 89-0126 (1989).
- 9) F. E. Marble, G. J. Hendricks and E. E. Zukoski : AIAA Paper 87-1880 (1987).
- 10) A. Kummar, D. M. Bushnell and M. Y. Hussaini : AIAA Paper 87-1882 (1987).
- 11) J. P. Durummond, M. H. Carpenter, D. W. Riggins and M. S. Adams : AIAA Paper 89-2794 (1989).
- 12) E. M. Fernando and S. Menon : AIAA Paper 91-1721 (1991).
- 13) I. A. Waitz, F. E. Marble and E. E. Zukoski : AIAA Paper 91-2265 (1991).
- 14) J. Naughton, L. Cattafesta and G. Settles : AIAA Paper 98-2456 (1989).
- 15) 西岡通男 : NAL SP-12 (1990) 39-42.
- 16) 野村聡幸, 石井隆次, 西岡通男 : 第9回航空機計算空気力学シンポジウム講演集 (1991).
- 17) 西岡通男, 須浪徹治 : 日本流体力学会「ながれ」投稿中.
- 18) 須浪徹治, 徳永英紀, 西岡通男 : 第26回乱流シンポジウム講演論文集 (1994).