

超音速剪断層と縦渦の干渉

浅井智広, 坂上昇史, 西岡通男 (大阪府立大・工・航空宇宙)

Interaction between Supersonic Shear Layer and Streamwise Vortices

T.Asai, S.Sakaue, and M.Nishioka

Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University

ABSTRACT

The supersonic mixing enhancement utilizing the interaction between supersonic shear layer and streamwise vortices is investigated numerically on the basis of 2-dimensional TVD method. The interaction is found to be very effective in enhancing supersonic mixing, because the stable vorticity field of streamwise vortices is made complex by baroclinic torque produced by the interaction. Moreover, the combination of their rotation has a strong influence on the flow field. Co-rotating vortices are better in increasing the contact area of two different gas species, while counter-rotating vortices better in entraining much fluid into them. It is also proposed to use unstable streamwise vortices of which vorticity exists over an off-centre, annular region only. We have found that the contact area is increased greatly by using those vortices.

Key Words: supersonic mixing enhancement, supersonic shear layer, streamwise vortices

1 はじめに

将来の極超音速機用エンジンとしてスクラムジェットエンジンが有望視されている。その開発に向けての技術課題として「超音速混合の促進制御」の問題がある。その最も効果的な方法として「縦渦」を利用する方法が提案された。超音速流中でも、この縦渦により非圧縮混合層に匹敵するぐらいの連行量が得られることが示され、その有効性がわかっている [1, 3]。しかし、形成された縦渦は安定で、分子レベルでの混合をさらに促進させるためには、その安定な縦渦を速やかに小スケールの渦に崩壊させなければならない。そのための方法として、本研究では剪断層と縦渦列の干渉による混合促進を考え [2]、渦列の回転方向や縦渦の渦度分布も考慮に入れて、TVD法に基づく2次元の数値計算により調べた。

2 計算モデル

計算モデルの概念図を図1に示す。本研究では縦渦導入モデルにより形成される縦渦列と、そのモデルから流下する剪断層(後流タイプ)との干渉を考えている。数値計算では、流れ方向の3次元的空间発展を、2次元断面内での時間発展を追うことによりモデル化し、2次元計算を行った。支配方程式としては、粘性の影響が小さいと考え、圧縮性Euler方程式を用い、慣性項はChakravarthy-OsherのTVDスキーム [4]により評価し、時間積分は2次精度陽解法により行った。また、渦列の回転方向として、交互逆方向回転と同方向回転の2種類を考える。なお、計算対象としてはその中の一つの縦渦だけを考え、渦列の回転方向は境界条件により考慮する。縦渦の渦度分布は、一般に縦渦中心で極大値をもつ

ガウス分布型であるが、中空型の渦度分布をもつ縦渦も考える(図2)。初期条件としては、まず縦渦の渦度分布を定め、その誘起速度として周方向速度分布を求める。また密度分布としては剪断層の分布(図3)を用いる。この誘起周方向速度分布と密度分布を満たすように圧力分布を決め、これらを初期条件とした。また、剪断層の主流は、マッハ数 $M_\infty = 2.5$ 、静温度 $T_\infty = 128[K]$ とする。

3 結果

計算は2次元で時間発展的に行っているが、以下の図では、主流の速度(567.1[m/s])で、時間を流れ方向の距離 x [mm] に変換している。

3.1 剪断層と縦渦の干渉

まず、一様流中に縦渦だけがある場合(渦度場:図6)、縦渦はほぼ同じ分布を保っており安定であるといえる。次に、縦渦が剪断層中にある場合(渦度場:図7)を見ると、剪断層と縦渦の干渉により、渦度分布が螺旋状に複雑化していくのがわかる。これは、剪断層の密度場が縦渦の作用によって内部に巻き込まれていくことにより、バロクリニックトルクが強く働き、それにより渦度場が変化するからである(密度場:図8、バロクリニックトルク場:図9)。このように剪断層と縦渦の相互干渉により、安定な縦渦の渦度場が非常に複雑化することは、超音速混合の促進に非常に有効であると考えられる。

3.2 縦渦列の回転方向の影響

逆方向回転縦渦列(密度場:図8)では縦方向(y 方向)から、また同方向回転縦渦列(密度場:図10)では横方向(z 方向)から、流体が縦渦内部に取り込まれていく様子がうかがえる。このように渦列の回転方向により、流れ場の変化の様子が大きく異なる。縦渦中心を通る水平線を異種流体間の接触面と考え、その面積の大きさの流れ方向変化(図4)を見る

と、同方向回転渦列の方が接触面積が増加している。一方、図5より縦渦内部に取り込まれる流体の量(エントレインメント)は逆方向回転縦渦列の方が多いことがわかる。これにより渦列の回転方向を工夫することで混合の制御ができるといえる。

3.3 中空型の渦度分布をもつ縦渦

縦渦が中空型の渦度分布をもつ場合(渦度場:図11)、縦渦内部で孤立渦が生成され、非常に複雑な流れ場になる。その生成した孤立渦により、ガウス分布型縦渦の場合よりも接触面積が著しく増加する(図4)。

4 まとめ

- 超音速剪断層と縦渦が干渉し合うことにより、バロクリニックトルクが働き、安定な縦渦の渦度場が非常に複雑化する。
- 縦渦列の回転方向により流れ場が大きく異なり、回転方向を変えることで混合の制御が可能である。
- 縦渦の渦度分布を中空型にすることで、孤立渦が生成され、接触面積が著しく増加する。

参考文献

- [1] 西岡通男, 須浪徹治: 超音速混合の促進制御に関する考察と実験, 日本流体力学会誌「ながれ」14(1995)377-389
- [2] 西岡通男, 須浪徹治: 縦渦間の干渉を利用した超音速混合の促進制御に関する実験, 日本流体力学会誌「ながれ」15(1996)45-54
- [3] Sunami, T., Wendt, M.N., and Nishioka, M., "Supersonic Mixing and Combustion Control Using Streamwise Vortices," AIAA Paper 98-3271, 1998.

[4] Chakravarthy,S.R., and Osher,S., “A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws,” AIAA Paper 85-0363,1985.

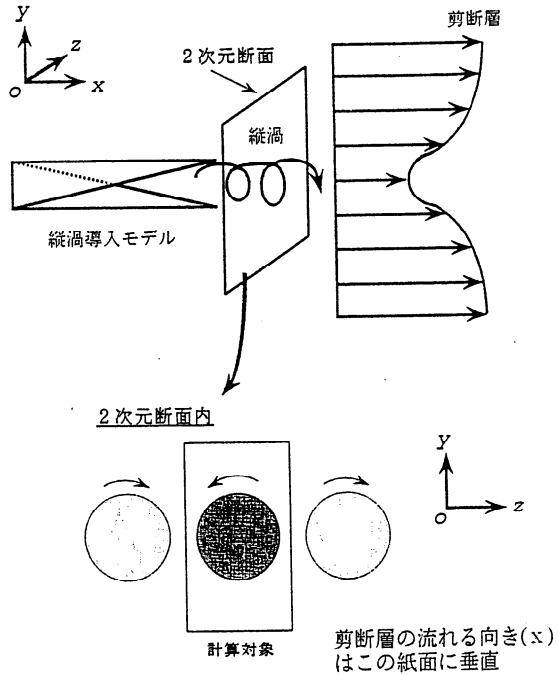


図 1: 計算モデルの概念図

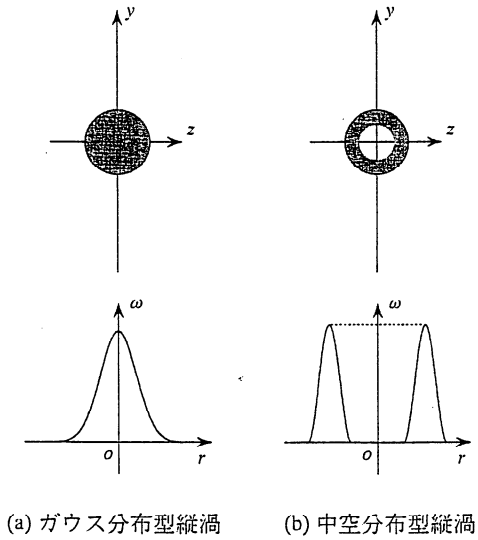


図 2: 縦渦の渦度分布の概念図

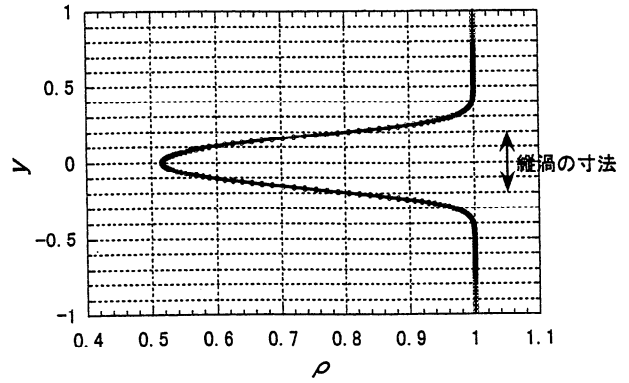


図 3: 剪断層 (後流タイプ) の密度分布

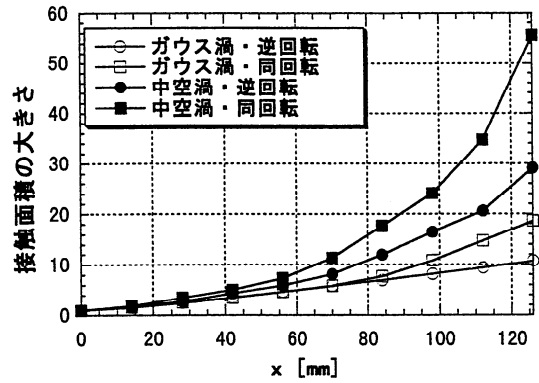


図 4: 接触面積の大きさの流れ方向変化

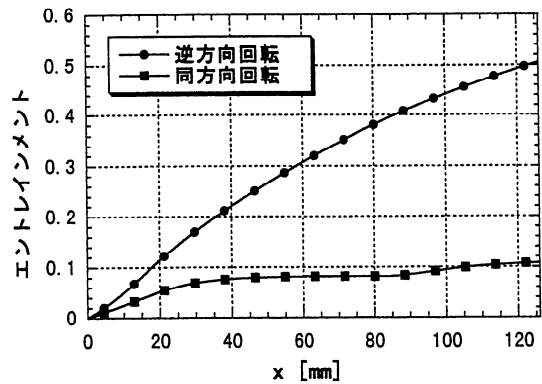


図 5: エントレインメントの流れ方向変化 (ガウス型縦渦)

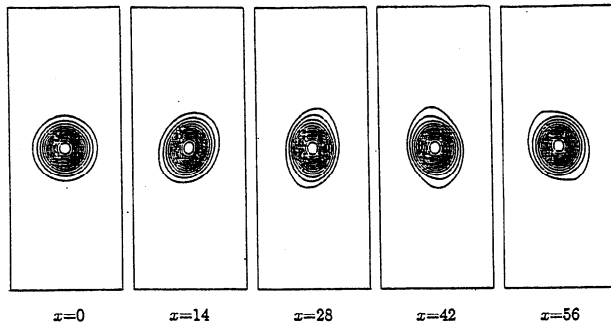


図 6: 等渦度線図 (一様流・ガウス縦渦・逆回転)

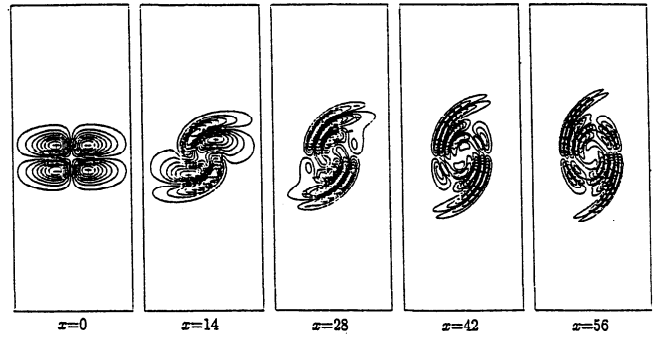


図 9: バロクリニックトルク線図 (剪断層・ガウス縦渦・逆回転)

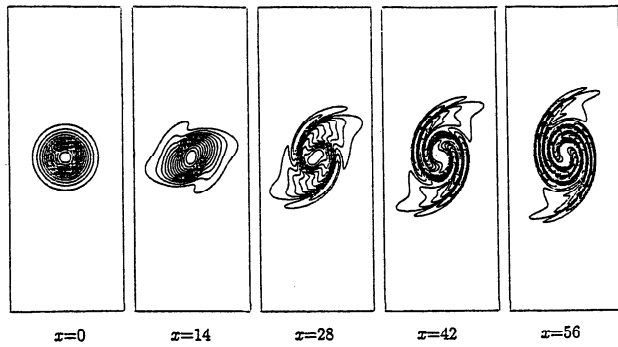


図 7: 等渦度線図 (剪断層・ガウス縦渦・逆回転)

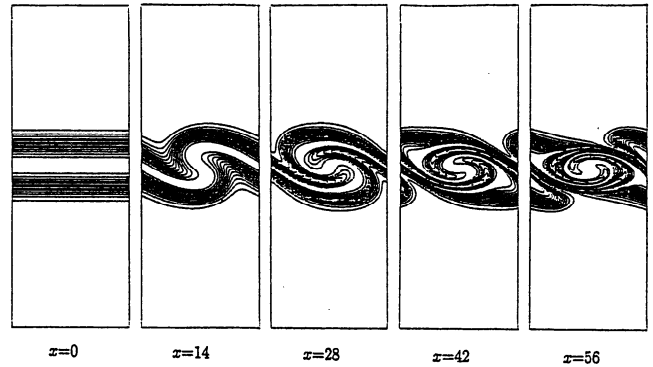


図 10: 等密度線図 (剪断層・ガウス縦渦・同回転)

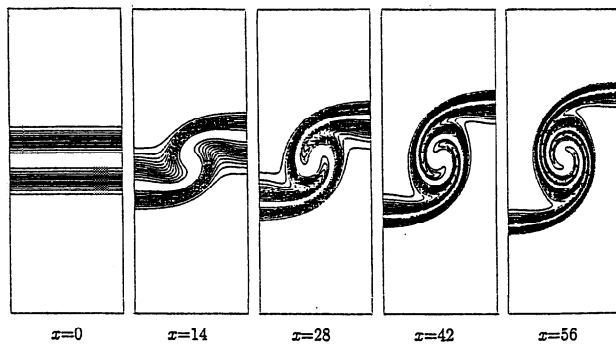


図 8: 等密度線図 (剪断層・ガウス縦渦・逆回転)

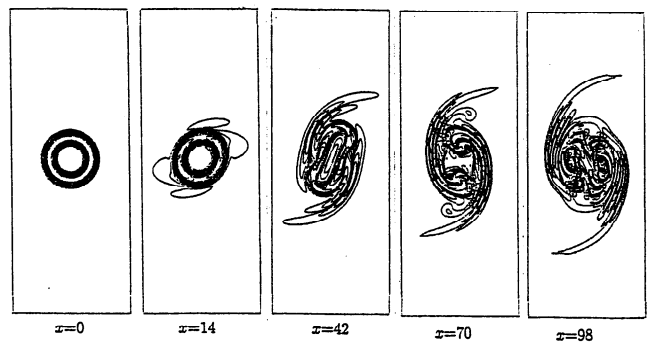


図 11: 等渦度線図 (剪断層・中空縦渦・逆回転)