

超音速流中における縦渦を用いた混合促進に関する研究

A study on mixing enhancement by streamwise vortices in a supersonic shear layer

○大坂淳（東大工），中谷辰爾（東大工），今村宰（東大新領域），津江光洋（東大工），河野通方（東大工）

Jun OSAKA*, Shinji NAKAYA*, Osamu IMAMURA**, Mitsuhiro TSUE* and Michikata KONO*

*Dept. of Aero. and Astro., University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan

**Dept. of Advanced Energy, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan

Growth of spanwise disturbances existing in a compressible curved shear layer was investigated by linear stability analysis. Like Görtler vortices in boundary layer along a convex curved wall, the fact was confirmed that a curved shear layer is unstable to spanwise disturbances when velocity of outer fluid is larger than that of inner one and these disturbances form streamwise vortices. Within the scope of liner theory, there are no effects of compressibility on growth of spanwise disturbances in contrast to the case of streamwise disturbances. In other words, growth rates of spanwise disturbances relatively exceed those of streamwise ones when effect of compressibility is large. In addition, a large curvature gives large growth rates of spanwise disturbances. Further study able to treat nonlinear effects is necessary to investigate details of streamwise vortices formed in a supersonic curved shear layer.

1. まえがき

スクラムジェットエンジン実現を阻む技術的問題の1つに、燃焼器内における超音速空気流と燃料流の混合の問題がある。圧縮性の効果が顕著になる流れ場では、流れ場内の擾乱の成長が著しく抑制され、ひいては流体混合が大きく阻害される。この問題を回避する方法として、三次元的な渦構造を用いる方法が過去の研究により提案されており¹⁾、混合促進に対する有効性が解析及び実験的に示されている。本研究においては、三次元的渦構造の中でも流れ方向のみに回転軸を持つ縦渦に注目する。対象となる流れ場は、曲率を持つせん断流れである。擾乱の成長率を調べることで、縦渦の混合促進に及ぼす効果が解析的に調べられている。

2. 解析方法

本研究で対象とする流れ場及び座標系を Fig.1 に示す。本研究では、内側に高速流、外側に低速流が流れるような曲率を持ったせん断流れを対象とする。せん断層の曲率半径を R_d と定義する。類似する流れ場として、凸型壁に沿って形成される境界層を含む流れ場がある。このような流れ場には Görtler 不安定性により、縦渦が成長することが知られている²⁾。

本研究では線形安定性理論³⁾を用いる。基本流れとして、流れ方向速度には双曲正接関数、静温分布は Crocco-Busemann の関係式を採用した。速度比及び密度比はそれぞれ 0.1, 1.0 に統一されている。全ての変動量を以下の形に表す。

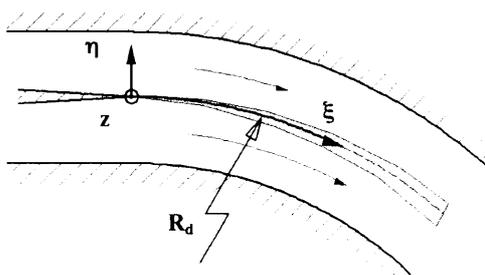


Fig.1 Schematics of flow field.

$$\mathbf{f}' = \hat{\mathbf{f}}(\eta) \exp[i(\alpha\xi + \beta z - \omega t)] \quad (1)$$

距離はせん断層渦度厚さ、他全ての状態量は高速流の状態量で無次元化されている。本研究では時間発展モデル⁵⁾が採用されている。 α 及び β はそれぞれ流れ方向、スパン方向の波数。 ω は複素角周波数である。 ω の虚部は擾乱の時間増幅率を表す。縦渦はスパン方向擾乱が存在する場合に対応し、 $\alpha=0$ となる。圧縮性流体の基礎方程式を基本流れの周りに線形化することにより、 ω を固有値とした、以下の固有値問題に帰着される。

$$[\mathbf{A} + \mathbf{A}_v] \mathbf{d} = \omega \mathbf{d} \quad (2)$$

$$\mathbf{d} = [\hat{\rho} \quad \hat{u} \quad \hat{v} \quad \hat{w} \quad \hat{T}]$$

直接スペクトル法⁴⁾が解法として用いられた。 \mathbf{A} 及び \mathbf{A}_v はそれぞれ対流項及び粘性項に対応している。非粘性流体を扱うときには、 $\mathbf{A}_v = \mathbf{0}$ となる。

3. 結果及び考察

以下、Fig.5以外は全て非粘性流体を扱っている。Fig.2に曲率を持たない場合の流れ方向擾乱の増幅率を示す。圧縮性の大きさを表す移流マッハ数 M_c ⁶⁾の増大に伴い、増幅率が著しく減少していることがわかる。Fig.3に $R_d=10^3$ の場合の

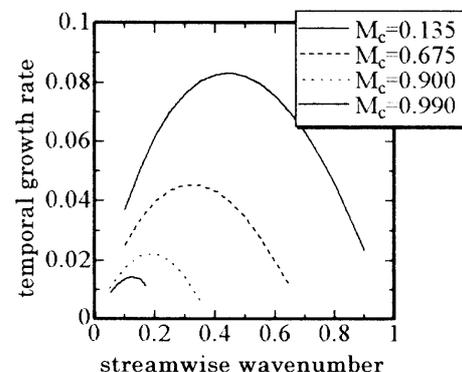


Fig.2 Temporal growth rates of streamwise disturbances.

パン方向擾乱の増幅率を示す。増幅率は移流マッハ数の影響を全く受けていないことがわかる。さらに、移流マッハ数が大きい場合には、流れ方向擾乱よりも大きな増幅率を示すことがわかる。Fig.4 には、 $\beta=4.0$, $M_c=1.35$ の場合における流れ方向渦度及び速度ベクトル場が示されている。スパン方向擾乱により、きれいな逆回転流れ方向渦が流れ場内に形成されていることがわかる。

Fig.3.において、増幅率はスパン方向波数に対していずれも単調増加している。一方で、流れ方向擾乱の場合は、Fig.2 より最大の増幅率を与える波数が存在する。Fig.5 に粘性を考慮した場合のスパン方向擾乱の増幅率を示す。せん断層厚さを用いたレイノルズ数に 5.0×10^4 を選んだ。大きな波数の乱れは粘性の影響を顕著に受けるため、非粘性の場合に比べて増幅率が減少していることがわかる。これより、実際の流れ場では、最も混合促進に適したスパン方向擾乱が存在すると考えられる。

Fig.6 に、曲率が増幅率に及ぼす影響を示す。曲率が大きくなるにつれて増幅率も大きくなることがわかる。

本研究で用いた解析方法は線形理論に基づいているため、

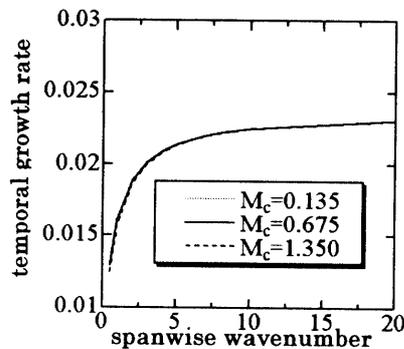


Fig.3 Temporal growth rates of spanwise disturbances.

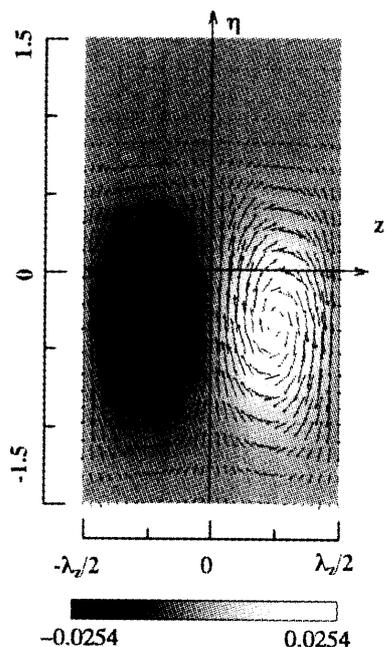


Fig.4 Streamwise vorticity and velocity field for $R_d=10^3$, $\beta=4.0$ and $M_c=1.35$.

衝撃波等による損失は考慮されていない。従って、実験及び流れ場の数値計算による詳細な研究が必要である。これらの研究は現在進行中である。

4. まとめ

曲率を持つせん断層内に形成される縦渦が混合促進に及ぼす影響が調べられた。線形安定性理論により得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 曲率を持つせん断流れは、外側の流速が内側の流速よりも大きい場合、スパン方向擾乱に対して不安定である。
- 上記のようなせん断層内では、スパン方向擾乱は縦渦を形成する。
- 圧縮性の影響が大きな場合、スパン方向擾乱は相対的に成長率が大きくなる。
- 粘性流体を考えた場合、最大の増幅率を示すスパン方向擾乱が存在する。
- 曲率が大きいほどスパン方向擾乱の成長率は大きくなる。

参考文献

- 1) Araki, M. et al, Proc., ISABE (2001), CD-ROM.
- 2) Görtler, H., NACA, T.M., 1375 (1954).
- 3) Sandham, N. D. et al, J. Fluid Mech., 224 (1991), pp.133-158.
- 4) Maekawa, H. et al, J. Jpn. Soc. Mech. Eng., B, 59 (1993), pp.63-68.
- 5) Sandham, N. D. et al, AIAA J., 28 (1990), pp.618-624.
- 6) Papamochou, D. et al, J. Fluid Mech., 197 (1988), pp.453-457.

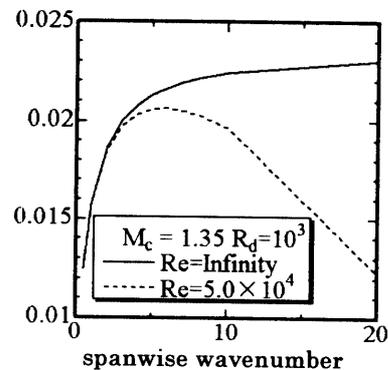


Fig.5 Effect of viscosity on temporal growth rates.

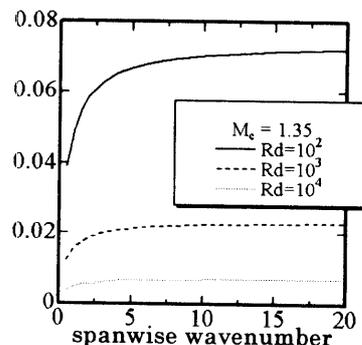


Fig.6 Effect of shear layer radius on growth of spanwise disturbances.