

二次不安定性により励起される縦渦構造が 超音速せん断層の成長に及ぼす影響

学生証番号 46210 氏名 野田 大介
 (指導教員 河野 通方 教授)

Key Words : shear layer, disturbance, secondary instability, streamwise vortex

1 背景と目的

将来の宇宙往還機用エンジンとして、スクラムジェットエンジンの研究が様々なところでなされているが、その実現を妨げる問題の一つに、超音速空気流と燃料流の混合に関する問題がある。このような圧縮性の大きな流れ場では、流れ場内に存在する微小擾乱が成長しにくく、渦構造の成長ひいては乱流混合が抑制される。この結果、燃焼効率及びエンジンの性能低下につながる。

一般に、速い流れと遅い流れが平行に流れるせん断流れは、流れ方向擾乱に対して不安定である（一次不安定性）。この結果、流れ場内の流れ方向擾乱が成長して、せん断層内にはスパン方向渦列が形成される。さらに、スパン方向渦列を含むせん断流れは、スパン方向擾乱に対して不安定であり、擾乱が成長して三次元的な縦渦構造が発達する。（二次不安定性）。このような渦構造の発達により、せん断層領域が拡大し、混合が促進される。ここで、流れ方向に軸を持つ縦渦は、圧縮性の影響を受けにくいということが過去の研究に示唆されている。

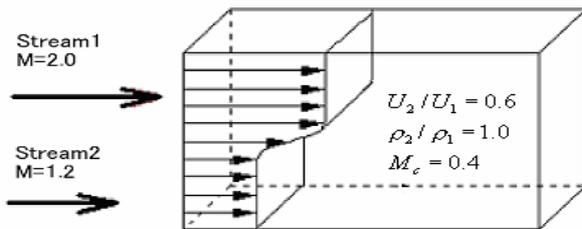


図1 流れ場の概要

2次不安定性問題の結果

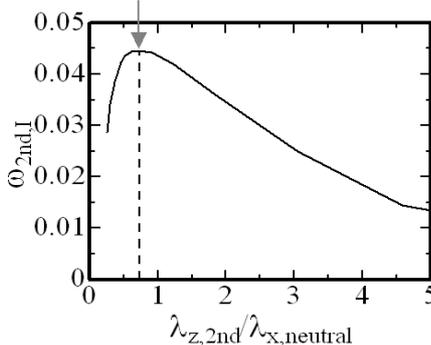


図2 スケール比と時間増幅率

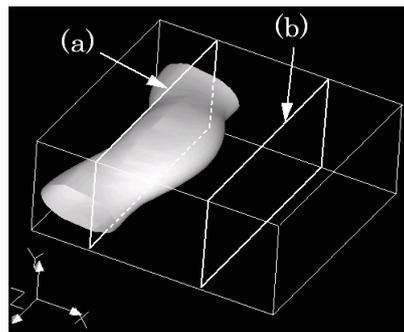


図3 渦構造(第2不変量等値面)

本研究の目的は、超音速流において、二次不安定性により誘起された縦渦構造および縦渦構造がせん断層の成長に及ぼす影響を調べることである。方法として線形安定性解析および空間発展計算を用いた。どちらの計算でも基本流れとして図1のパラメータを用いた。

2 線形安定性解析

線形安定性解析では、全ての状態量を次の形に表し、方程式系を線形化することで、固有値問題を解く。

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_{basic} + \varepsilon \mathbf{f}'$$

$$\mathbf{f}' = \hat{\mathbf{f}}(x, y) \exp [i(\alpha x + \beta z - \omega t)]$$

\mathbf{f}' は擾乱を表し、 \mathbf{f}_{basic} はその擾乱に対して不安定か調べたい基本流れを表す。固有関数として $\hat{\mathbf{f}}$ 、固有値として ω が求まる。 ω の虚数部は時間増幅率を表し、正の場合、基本流れはその擾乱に対して不安定となる。

2.1 一次不安定性 基本流れを層流せん断流れとして、流れ方向擾乱($\beta=0$)に対する不安定性（一次不安定性）を調べた。その結果、擾乱の波数の変化に対して、増幅率が最大となる dominant mode と、増幅率が正から0になる neutral mode の解が求まった。neutral mode は「擾乱が成長しきった」モードと解釈でき、層流せん断流れを重ねて流れ場を描くと、明瞭なスパン方向渦が確認された。

2.2 二次不安定性 層流せん断流れと一次不安定性問題で得られた neutral mode 擾乱の重ね合わせを基本流れとし、スパン方向擾乱($\alpha=0$)に対する不安定性（二次不安定性）を調べた。擾乱のスケール比と時間増幅率の関

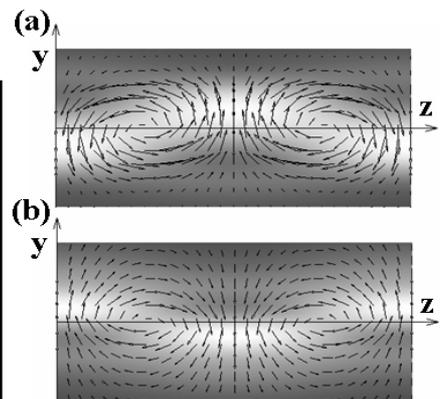


図4 スパン方向渦度,速度ベクトル場

係が図2に表され、最大の増幅率を与えるスケール比は、0.73となった。得られた擾乱を基本流れに加えて流れ場を描く。図3より、スパン方向渦が変形を受けていることが分かる。(a)core plane, (b)saddle planeで流れ場を見ると(図4)、二つの平面には、流れ方向渦(縦渦)が存在している。同じz位置で比べると、両平面において、縦渦の回転は逆向きになっていることがわかる。

3. 空間発展計算

3.1 計算方法 一次不安定性問題と同一の流れ場で、圧縮性Navier-Stokes方程式を支配方程式として採用した。流入境界において、微小な擾乱成分を流れ場に導入することにより渦構造を励起した。Case1として、二次不安定性問題との比較のために、単一の流れ方向擾乱のみを含む場合、Case2として、擾乱の相互作用を調べるため、二種類の擾乱を含む場合、Case3として、現実に近い流れ場を調べるため、増幅し得る全ての擾乱を含む場合を取り扱った。三次元的な渦構造をできる限り計算領域上流で励起するために、擾乱は以下の式を用いた。

$$v'(x=0, y, z, t) = \sum_i^N \varepsilon_i f[y - \delta \cos(\beta_z z)] \sin(-\omega_i t + \phi_i)$$

$$f(y) = \exp(-ay^2)$$

3.2 二次不安定性により誘起される渦構造 Case1において、図5より、スパン方向渦に絡み付くように成長する、細い管状をした渦構造が観察された。この渦構造により、スパン方向渦は、スパン方向に変形を受けている。変形したスパン方向渦構造を「コア」と呼ぶ。図6で、黒と白の領域は、それぞれx軸正の向きおよび逆向きの渦度を有している。これより、管状の渦構造は縦渦であることがわかる。これは「リブ構造」と呼ばれる。また、

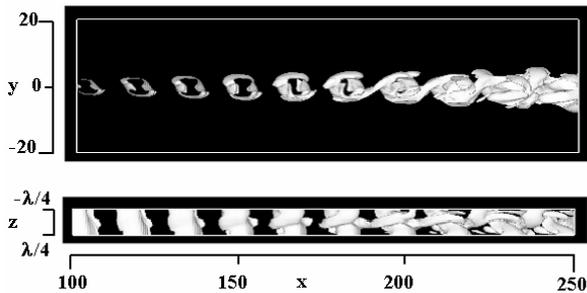


図5 第二不変量等高面 (case1)

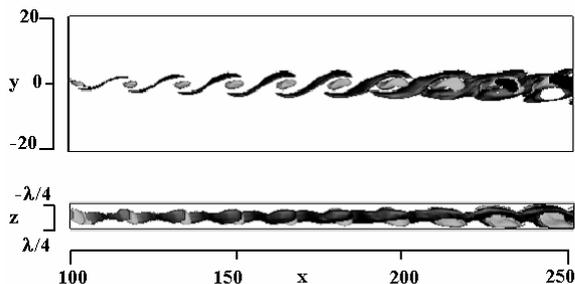


図6 流れ方向渦度等高面 (case1)

リブ構造とコアは逆向きの回転方向を有していることがわかる。二次不安定性問題と照らし合わせ、流れ場の二次不安定性を励起できたと確認した。

case2, case3の詳細は割愛するが、渦構造が不規則に成長するような流れ場の中に、同様の渦構造を確認した。

3.3 せん断層の成長に与える影響 case3において、リブ構造がせん断層の成長に及ぼす影響を調べるために、せん断層厚さをピトー圧分布から求めた。図7に、x方向へのせん断層厚さの変化を示す。「x = 300よりも下流の領域」では、条件によって、せん断層厚さに差異が見受けられ、いずれの三次元計算においても、二次元計算よりせん断層厚さは大きくなっている。これは、リブ構造が卓越するためであると考えられる。リブ構造がせん断層の成長率に与える影響を調べるため、「x = 300よりも下流の領域」におけるグラフの傾きを成長率として算出した。その結果、スケール比 $\lambda_z / \lambda_{x, dom}$ が1付近の場合に成長率は最大となり、二次元計算に比べて55%の増加が認められた。線形安定性解析では、スケール比0.73の場合に増幅率が最大となっていた。Case3では、増幅率が正となる全ての擾乱を含んでおり、pairingなどの非線形成長の影響を受ける。このような擾乱の成長過程に関する相違が、第一の原因として考えられる。

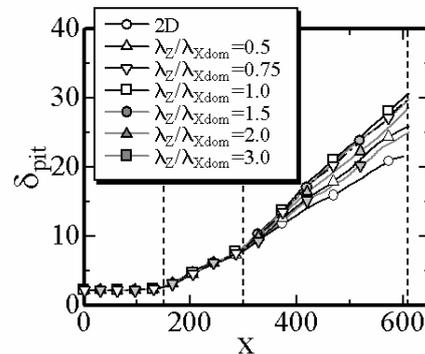


図7 せん断層厚さのx方向推移

4. 結論

線形安定性解析の二次不安定性問題において

- ・コアおよびサドル部に逆向きの回転の縦渦対が観察され、縦渦構造の初期発達段階と確認された。
- ・最大の増幅率を与えるスパン方向渦列に対するスパン方向擾乱のスケール比は、0.73となった。

三次元空間発展計算において

- ・用いられた励起方法によって、流れ場の二次不安定性を励起することができ、縦渦構造の非線形発達を捉えることができた。
- ・縦渦構造の影響により、せん断層厚さおよび成長率は二次元計算の場合に比べて増加した。
- ・最大の成長率を与える流れ方向擾乱に対するスパン方向擾乱のスケール比は1.0で、成長率は二次元計算の場合に比べて55%増加した。