

論文の内容の要旨

論文題目 超音速せん断層の二次不安定性励起による混合促進

氏名 荒木 幹也

1. はじめに

次世代宇宙往還機のエンジンとして、スクラムジェット・エンジン (SCRamjet Engine : Supersonic Combustion Ramjet Engine) に注目が集まっている。スクラムジェット・エンジンは、ラムジェット・エンジンの一種であり、大気中の酸素を酸化剤として使用する。このため、ロケット・エンジンのように大量の酸化剤を携帯する必要がないという大きな利点をもつ。従来のラムジェット・エンジンでは、吸入した空気を圧縮する際に、これを亜音速まで減速する。しかしながら極超音速飛行を目指す場合、空気流を亜音速まで減速すると、過度な温度上昇をまねき、エンジンは深刻な障害を受ける。スクラムジェット・エンジンでは、空気流の圧縮を超音速にとどめ、この問題を回避する。しかしながら一方で、空気流が超音速であるために生じる問題もある。超音速空気流と燃料流の混合の問題である。圧縮性の増大とともに流れ場の安定性は増大し、乱流混合は極めて進みにくくなる。この結果、燃焼効率は低下し、エンジンの性能は低下する。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混合促進が重要な課題となる。

本研究では、超音速乱流混合の最も単純な場として、超音速せん断層に着目した。平行に流れる二つの流れの間にせん断層が形成される。せん断層の乱流遷移過程は以下のように説明される。(i) 流れ場の一次不安定性により、流れ場の中のじょう乱が増幅され、スパン方向に軸を持つ渦が形成される。(ii) その後、流れ場の二次不安定性により、流れ方向の渦が形成される。(iii) 渦にエントレインされた流体は、やがて分子レベルで混合する。したがって、渦の発達の促進が、混合促進の重要な鍵となる。つまり、渦の発生の原因である不安定性の増大が、混合促進の重要な鍵となる。

これまでの研究から、圧縮性の増大とともに一次不安定性は著しく抑制されることが明

らかになっている。しかしながら、二次不安定性が圧縮性の影響をどの程度受けるのかは、ほとんど知られていない。そこで本研究では、二次不安定性が、超音速せん断層の発達に及ぼす影響を、実験的および解析的に検討した。

2. 実験装置および方法

本研究の実験は、矩形断面を持つブローダウン方式の超音速風洞で行った。マッハ数 1.78 の超音速空気流に対して、平行にマッハ数 0.29 の亜音速空気流を噴射した。超音速空気流と亜音速空気流の間に超音速せん断層が形成される。本研究の実験では、(I) 単せん断層および (II) 二重せん断層の二種類のせん断層について検討を行った。

本研究の実験では、二次不安定性すなわち流れ方向渦の発生を励起する方法として、正弦曲線に加工したトレーリング・エッジを用いた。正弦曲線の波長を λ 、振幅を A とし、様々な形状のトレーリング・エッジについてその影響を調べた。また、二重せん断層の実験においては、上下のトレーリング・エッジの正弦曲線の位相をそろえたもの（対称型）と、180度位相をずらしたもの（非対称型）を用い、位相の影響も調べた。

本研究の実験では、(i) Mie散乱法を用いた流れ場の可視化および(ii) ピトー圧分布の測定によるせん断層の厚さの見積もりを行った。Mie散乱法による流れ場の可視化では、粒径約 $2\ \mu\text{m}$ の散乱粒子を亜音速流に加えた。光源には、第二高調波 (532 nm) のNd-YAGパルスレーザーを用いた。レーザー光をシート状にし、流れ場に入射した。レーザー・シートの厚さは1 mm以下である。撮影は、イメージ・インテンシファイア内臓CCDカメラで行った。レーザー・シートおよびカメラの位置を様々に変え、せん断層の側面、上面、断面のそれぞれの方向からの可視化を行った。

3. 実験結果および考察

本研究の実験では、各実験条件において、一次不安定性に起因するスパン方向渦、および二次不安定性に起因する流れ方向渦の発達の様子に注目する。また、各実験条件におけるせん断層の成長率に注目する。

3. 1. 単せん断層

直線型トレーリング・エッジを用いた場合、Mie散乱像より、スパン方向渦はほとんど形成されていないことが分かった。これは、超音速せん断層の多くの研究において見られる現象で、圧縮性の増大によりスパン方向渦の形成が阻害されているものと考えられる。また、ピトー圧分布、Mie散乱像のいずれから、せん断層はスパン方向に一様に形成されることが分かった。つまり、流れ方向渦が形成されないことが分かった。

曲線型トレーリング・エッジを用いた場合、Mie散乱像より、直線型トレーリング・エッジを用いた場合と同様にスパン方向渦はほとんど形成されないことが分かった。一方、ピトー圧分布、Mie散乱像の双方から、せん断層に、トレーリング・エッジの周期にあわせて流れ方向渦が導入されることが分かった。

ピトー圧分布より見積もったせん断層厚さの流れ方向変化から、せん断層の成長率を求めた。その結果、直線型、曲線型いずれの場合も成長率はほぼ同じであった。したがって、

単せん断層の場合、曲線型トレーリング・エッジの使用は混合促進の効果がないことが分かった。一次不安定性によるスパン方向渦が形成されない場合、二次不安定性の流れ方向渦の成長率はゼロとなることが線形安定性解析より示されている。この実験結果は、一次不安定性によるスパン方向渦が形成されないことによると考えられる。

3. 2. 二重せん断層

直線型トレーリング・エッジを用いた場合、Mie散乱像より、カルマン渦状のスパン方向渦が盛んに形成されていることが分かった。これは、他の超音速二重せん断層の研究においても見られる現象で、コアの加速により圧縮性の影響が緩和され、スパン方向渦の形成が盛んになっているためと考えられる。また、ピトー圧分布、Mie散乱像のいずれからも、せん断層はスパン方向に一様に形成されることが分かった。つまり、流れ方向渦が形成されないことが分かった。

曲線型トレーリング・エッジを用いた場合、Mie散乱像より、直線型トレーリング・エッジを用いた場合と同様に、カルマン渦状のスパン方向渦が盛んに形成されていることが分かった。また、ピトー圧分布、Mie散乱像の双方から、せん断層に、トレーリング・エッジの周期にあわせて流れ方向渦が導入されることが分かった。

ピトー圧分布より見積もったせん断層厚さの流れ方向変化から、せん断層の成長率を求めた。対称型トレーリング・エッジを用いた場合、せん断層の成長率は、直線型トレーリング・エッジを用いた場合とほぼ同じであった。一方、非対称型トレーリング・エッジを用いた場合、せん断層の成長率は、直線型トレーリング・エッジを用いた場合と比較して最大で約80%増大した。この結果は、(i) 二重せん断層においては、一次不安定性によるスパン方向渦が形成されること、(ii) 対称型では導入された流れ方向渦が相殺するのに対し非対称型では相殺することなく流れ場にとどまることの二つの理由によるものであると考えられる。

以上の結果から、曲線型トレーリング・エッジは、超音速二重せん断層においてのみ、かつ非対称型トレーリング・エッジを用いた場合にのみ混合促進効果を発揮することが明らかになった。またその際の混合促進効果は約80%であり、混合促進に非常に有効であることが示された。

4. 解析方法

本研究では、流れ場の不安定性を調べる方法として、線形安定性解析を用いた。これは、安定性を吟味したい基本流れに微小振幅のじょう乱を重ね合わせ、その消長を調べるものである。本研究の解析では、時間発展モデルを採用した。

まず、流れ場の一次不安定性を調べた。基本流れとして、層流のせん断層を仮定する。せん断層の速度分布は、以下のように与えた。

$$\bar{u} = U_r + 0.5(1 - U_r)\{1 + \tanh(y)\}$$

ただし、 U_r は速度比である。これに様々な波数のじょう乱を重ね合わせる。じょう乱は以下のように与えた。

$$\Phi_1(x, y, z, t) = \hat{\Phi}_1(y) \exp\{i(\alpha_1 x - \omega_1 t)\}$$

ただし、 $\Phi=(u,v,w,p,\rho,T)$ である。 $\hat{\Phi}$ は複素振幅を、 α は流れ方向波数を、 ω は周波数を意味する。添え字1は、一次不安定性を意味する。本研究では、一次不安定性におけるじょう乱は二次元じょう乱として与えた。このじょう乱を流れの基礎方程式（連続式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態式）に代入し、じょう乱の二次の項を微小として消去し線形化する。線形安定性解析は、固有値 ω および固有ベクトル Φ を求める固有値問題に帰着される。解法には、スペクトル法を用いた。得られた固有ベクトルから、一次不安定性により形成される流れ場を求めた。これは、スパン方向渦が周期的に並ぶ流れ場となる。

次に、流れ場の二次不安定性を調べた。基本流れとして、層流のせん断層に一次不安定性で形成されるスパン方向渦が重ねあわされた流れ場を仮定する。そこに様々な波数のじょう乱を重ね合わせる。じょう乱は以下のように与えた。

$$\Phi_2(x, y, z, t) = \hat{\Phi}_2(x, y) \exp\{i(\beta_2 z - \omega_2 t)\}$$

β はスパン方向波数を意味する。添え字2は、二次不安定性を意味する。本研究では、二次不安定性におけるじょう乱は伝播角度90度として与えた。このじょう乱を、一次不安定性の場合と同様に流れの基礎方程式に代入し、線形化する。そして固有値 ω および固有ベクトル Φ を求めた。

5. 解析結果および考察

二次不安定性は一次不安定性と比較して圧縮性の影響を受けにくいことが明らかになった。また、一次不安定性によるスパン方向渦の振幅の増大とともに、二次不安定性におけるじょう乱の増幅率が增大することが明らかとなった。この結果は、本研究の実験結果と一致するものである。