

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 The Dynamics of Premixed Hydrogen-Air Flame Fronts in a Narrow Channel

(狭小流路における水素-空気予混合気の火炎面不安定性に関する研究)

氏 名 辻 良史

小型エンジン、発動機等向けに燃焼器を小型化するにつれて、1.) いわゆる面積 - 体積比の増加に伴い熱損失の影響が大きくなり保炎が困難になること、2.) レイノルズ数  $Re$  の低下により燃焼器内部が全域層流になり、乱流火炎を用いた高燃焼強度の燃焼器を設計するのが困難なこと、などの特徴が見られるとすでに指摘されている。

層流火炎の火炎面不安定性は乱流火炎への遷移過程の理解に向けた基礎研究として古くから研究が行われている。その中で Joulin らは、燃焼による膨張を考慮しない熱拡散理論を用いて、火炎面不安定性が系からの熱損失によって増幅されることを示した。火炎が不安定になると、火炎面が増加し火炎強度が増加する。

以上より、小型燃焼器内で発生する熱損失には二つの側面があることが分かる。第一に、燃焼によって発生する熱を奪うことで燃焼器内での保炎を困難にすることが挙げられる。第二に、熱損失は火炎面不安定性を増幅し、その結果、火炎面面積を増加させ火炎強度を強める働きが期待される。従って、高い効率を維持しつつ燃焼器を小型化するためには、第二点の影響を正しく理解することが重要であり、本論文の主要な目的とした。

上記の目的を達成するために、壁からの熱伝導による熱損失が無視できない狭い間隙を有する平行平板の間を伝播する火炎を基礎モデルとして選択して、火炎面不安定性に関して解析を行うこととした。

一般的な火炎の厚さは  $0.1\text{--}0.01$  [mm] 程度であり、火炎の失火限界高さ(水素燃料を用いたとき、およそ  $\sim 1$  [mm] 以下) を考慮すれば、実際の小型燃焼器の限界寸法を反映する流路高さ  $H$  は、数ミリメートル  $H = O(1)$  [mm] であろう。したがって、本論文で対象とする平行平板の間隙距離は、 $H = O(1)$  [mm] 程度とした。

流路内の火炎面不安定性について、Joulin らは火炎内部構造を考慮しない流体力学理論を用いて、熱損失は既燃気体の温度を低下させるため火炎不安定性を低下させるとも報告している。ここに挙げた Joulin らによる二つの漸近解析の報告を併せて考えると、熱損失が

流路内の火炎面不安定性に与える影響を検討するにあたり、燃焼による膨張と火炎の内部構造を同時に考慮する必要があり、数値解析による手法が有効であると考えられる。

Kang、Kadowaki らは、基礎方程式を Navier Stokes 方程式とし、一段階 Arrhenius 型の反応モデルを用いた二次元解析を行い、火炎面に加えた擾乱の波数とその成長率の関係(分散関係)を求めた。Kadowaki らの熱膨張の効果を検討した解析によって、流路内の火炎面不安定が熱損失により増幅されることが示された。

彼らの二次元解析では、高さ方向流れおよび火炎形状が考慮されていないのだが、Kim によれば、 $H = O(1)$  [mm] の流路内の火炎が流路高さ方向に曲率を持つと報告されており、火炎面不安定性に対する流路高さの影響が無視できるかどうか検討する必要があると考えられる。

本論文により、高さ方向を考慮した三次元解析を行うことで、流路内の火炎面不安定に与える熱損失の影響と流路高さの関係を明らかにできれば、狭小流路における火炎面不安定性に対する熱損失の影響についての新たな知見につながり、小型燃焼器設計に役立てることも期待できよう。

以上を踏まえて、本論文では高さ  $H = O(1)$  [mm] の平行平板間を伝播する当量比 1.0 の水素 - 空気の層流火炎について、詳細反応を考慮した三次元数値解析を行った。既報の手法に倣い、初期条件として火炎面に与えた微小擾乱の成長を観察し分散関係を求め、流路高さ及び壁面熱条件を変化させることで熱損失によって火炎面不安定が増幅される条件があるかを明らかにした。

さらに、二次元解析と本三次元解析の結果を比較し、その違いを摂動解析を用いて定性的に考察した。近似を適用した解析を行うにあたり、本三次元解析で得られた流れ場の様子を詳細に観察し、速度場の主成分と摂動成分の大きさを調べた。上記観察によって調べた流れ場の大きさに関する知見に基づいて流路内に誘起された高さ方向の流れと火炎面不安定性の関係を摂動解析を用いて考察した。最後に、三次元解析と二次元解析で得られた分散関係の違いが流路内の高さ方向流れの影響によって説明できることを示した。

4.4、2.2、1.1[mm]の高さの流路内を定常伝播する火炎に流路スパン方向に波長を持つ擾乱を加えて、その擾乱の振幅の成長率を求めた。断熱、等温の各壁面熱条件において、流路高さを低くするほど分散関係が大きくなり、火炎面が擾乱に対して不安定になることが分かった。さらに、同一の流路高さにおける断熱・等温の条件の分散関係を比較すると、流路が高い  $H = 4.4$  [mm]では、熱損失があることにより火炎が安定になるが、 $H = 1.1$  [mm]

では、熱損失により火炎が僅かであるが不安定になっていることが分かった。

本三次元解析で求めた分散関係が、 $H = 1.1$  [mm] の等温の条件において既報の二次元解析で求められたものよりも小さく火炎が安定であるという結果が得られた。この原因を摂動解析を用いて考察した。数値解析によって得られた流路内の速度場の大きさに基づいて流路内の火炎面不安定性に対する高さ方向流れの影響を考察したところ、三次元解析では、高さ方向の流れの干渉により、断熱、等温の両条件において流れ方向速度が増加し、高さ方向を無視した二次元解析よりも火炎が安定になるということが示された。特に、熱損失があり密度比が小さい場合の方が、流れ方向速度の変化の影響が強くなり、既燃気での増速による火炎の安定化の作用が強くなることも示された。

本論文によって、平行平板間を伝播する火炎の火炎面不安定性について、流路高さ方向を考慮した三次元解析を行い以下の知見を得た。

- 流路高さを低くすると断熱及び等温条件において火炎面の不安定性は増加する。
- ある流路高さを境に、高い流路では壁面での熱条件が断熱の場合に火炎が不安定になるが、低い流路では、等温の場合に火炎が不安定になる。当量比 1.0 の水素 - 空気の場合はこの高さが失火限界の高さより大きかった。
- 三次元解析によれば、高さ方向を簡略化した二次元解析と比べて低い流路で熱損失のある場合の火炎面不安定性の増幅が小さくなり、その原因として既燃気の流れ場の高さ方向の干渉による影響が挙げられる。