

## 学 位 論 文 題 名

Research on the Transient Phenomena from a Laminar Flat  
Flame to Turbulent Flame Motions by Laser Irradiation Method

(レーザ照射法を用いた層流平面火炎の乱流挙動への遷移過程に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

The understanding of acoustic instability of propagation flames in a tube is of the most importance in the field of the combustion, because the instability can lead a high performance combustor to unsteady operation and serious damage. However, there are still unanswered questions to the mechanism of combustion driven instability in the acoustic field, and how the initial disturbance on the system grows to eventual and explosive phenomena. This research has particularly been motivated by an interest in the growth mechanisms of acoustic instability and the acoustic feedback.

The experiments with flames premixed  $C_2H_4/CO_2-O_2$  ( $Le < 1$ ) in a tube have been conducted. The mixture is ignited at the top, open end of the tube, and a flame front propagated toward the closed end of tube. The flat and cellular flames were selected as a default at each condition to observe the transition processes. The premixed gas inside the tube is exposed to the  $CO_2$  laser beam after activating the igniter, and then the  $CO_2$  laser beam preheats the unburned mixture just ahead of the flame surface locally at the center.

The flame fronts show different and unique behaviors depending on laser powers applied in the unburned mixture ahead of the reaction zone. The flame tip grows extremely fast. In the experiments, the fluctuation of flame intensity is augmented by the periodic increase in total flame surface area, which is induced by the curvature effects and acoustic pressure. This growth cycle is modulated with acoustic cycle, and it can result in the enhanced acoustic amplitude to reach turbulent motion with the satisfaction of Rayleigh's criterion. In this study, the detailed descriptions of flame front behaviors in the transient stage are presented, which give the general insight into the transition phenomena from the primary acoustic instability to turbulent motions, actively induced by the absorption of externally irradiated  $CO_2$  laser beam.

The threshold conditions at the transition are examined by applying continuous and limited exposure of  $CO_2$  laser beam. The presences of the transition are obtained in terms of laser powers, exposure time, and flame curvatures. In the detailed observations of curvature dynamics, the growing modes (decaying modes) are established just prior to the transition (no transition). The maximum curvatures

at the last cycle prior to the transition are obtained rigorously, and the results showed that the regime of the transition can be obviously distinguished through the critical curvature in a given tube length. The existence of the critical curvature is explained by the relationship between the pressure gradient inside the tube and local burned gas temperature behind the curved flame tip. The experimental findings show that the flame curvature plays an important role as an indicator of the transition phenomena to the explosive turbulent motion in the acoustic field.

The CO<sub>2</sub> laser method employed here could successfully control the initiation of the transition process by the development of an artificial disturbance, which made it possible to observe the phenomena precisely with highly-resolved imaging. In the present study, it has been pointed out that the transition phenomena were controlled by the condition such as acoustic amplitudes, flame surface area, acoustic frequency and flame shapes etc. This work will give the fundamentals to understand the thermal-acoustic instability, which is prevalent and unwanted in a high-load performance combustor.

**Keywords:** Acoustic Instability, CO<sub>2</sub> Laser Method, Diffusive-thermal Instability, Flame Curvature, Hydrodynamic Instability, Lewis Number, Propagating Flame, Pressure Gradient.

# 学位論文審査の要旨

主 査	教 授	藤 田	修
副 査	教 授	大 島	伸 行
副 査	教 授	近 久	武 美
副 査	准教授	中 村	祐 二

## 学 位 論 文 題 名

### Research on the Transient Phenomena from a Laminar Flat Flame to Turbulent Flame Motions by Laser Irradiation Method

(レーザー照射法を用いた層流平面火炎の乱流挙動への遷移過程に関する研究)

ガスタービン燃焼器においてはしばしば、火炎と音響場の相互作用に起因する不安定現象が大きな問題となり、これが時には燃焼器の破損要因にもなりうる。この問題に対し、より根本的な対応を行うには、火炎と音響振動の相互作用を基礎的立場から理解することが求められる。これに関連する従来からの研究として、伝播管と呼ばれる管に燃料・空気混合気を封入しその中で生じる気柱振動により伝播火炎が不安定化する過程を観察する手段が取られていた。しかし、この不安定化の進展については初期火炎に現れる擾乱の形態が重要な影響を与えるにも関わらず、従来これが全く制御されておらず、実験系に依存して受動的に現れる初期火炎の変形からの不安定性の進展を観察する研究しか存在していなかった。このため、これまで初期擾乱とその後の不安定性の進展の関連は十分に明らかにされているとは言えない。本研究では、まず管内伝播火炎が完全に平面状になる条件を実験的に見出した後、ここに外部から炭酸ガスレーザーを照射し火炎の変形を任意に制御するという新たな手法を導入することで、火炎の初期擾乱とその後の不安定性の進展の関連を明らかにしようとしている。この結果、初期の変形の大きさにより火炎が乱流状態へ遷移する臨界値が存在することや、平面火炎から乱流状態への遷移の際に生じている物理的過程を明らかにするなど、重要な成果を得ている。

本論文は全 6 章で構成されており、以下に各章の概要および成果をまとめる。

第 1 章では、火炎の不安定性の進展に関する一般的な理解および従来の研究を俯瞰するとともに、従来研究の課題を考察した。さらに、これに基づいて、本研究の目的をおよびその意義について述べている。

第 2 章では、本研究で用いた装置について記述するとともに、初期平面火炎の実現に必要な混合気組成および伝播管形状について示している。また、炭酸ガスレーザーを用いた火炎面形状制御手

法の原理、すなわち混合気中の燃料成分 (エチレン) にレーザーを選択的に吸収させこれにより局所的な燃焼速度を制御する手段について詳細に説明を行っている。

第 3 章では、前章で説明した装置を用いて平面火炎に任意の変形を与えられること、この変形を与えることで本来平面火炎としての伝播しか生じない火炎を任意に不安定化させ乱流状態への遷移を引き起こすことができることを示している。また、初期変形の程度によって、乱流状態に遷移する場合としない場合があり、遷移の生じる限界条件が存在することを示した。

第 4 章では、前章の結果から乱流状態へ遷移する典型的な条件を取り上げ、これについて初期擾乱の発生、その後の不安定性の進展、そして乱流状態への遷移の過程を高速度カメラにより克明に観察し、ここで生じている物理過程を明らかにしている。また、この観察から、初期擾乱が進展し火炎の表面積が拡大していく過程には、 $Le$ (レイス数) が 1 より小さいことによる Diffusive-Thermal Instability が重要な役割を果たすことを指摘している。

第 5 章では、火炎の変形が進展し、ある瞬間に先端が負の曲率 (凹型の形状) を持つと、その直後に火炎前縁に折れ曲がりが生じ急激に表面積が増大し、燃焼強度も急激に増大することで乱流状態に遷移することを指摘している。また、このことから、乱流への遷移に要する時間は火炎先端に負の曲率が現れるまでの時間で議論できるものとして、レーザー照射強度と乱流状態への遷移時間との関係を議論している。さらにこの乱流状態への遷移は、火炎先端の曲率がある一定値に到達した際に生じることを実験的に示した。

最終章 (第 6 章) は結論であり、本研究で得られた知見の総括を行うとともに、今後の研究の課題等について述べている。

これを要するに、著者は、従来制御することが出来なかった火炎の初期擾乱を管内平面伝播火炎とレーザー照射法を組み合わせることで任意に制御可能とし、この実験的手法により火炎の初期擾乱により乱流燃焼への遷移を能動的に引き起こすことを可能にしたうえで、その遷移がどのような物理的過程を経て生じているかを明らかにした。さらに、乱流状態への遷移の限界条件について先端曲率が重要な因子となっていることを明らかにしており、その成果は、エネルギー機器開発に関連する熱工学、なかでも燃焼工学への発展に貢献すること大なるものがある。

よって著者は、北海道大学 博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。