

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289042

研究課題名(和文) レーザ加熱火炎面曲率制御法によるGT燃焼器の不安定振動燃焼トリガー機構の研究

研究課題名(英文) A study on mechanisms triggering combustion instability of curved flame by using laser irradiation method for stable gasturbine combustor

研究代表者

藤田 修 (Fujita, Osamu)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：10183930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：ガスタービン燃焼器等で生じる不安定振動燃焼に関する基礎研究として、内径50mmの片側開放直管に予混合気を封入しその一端に着火した後に生じる燃焼振動現象の実験的観察を行った。管内を伝播する火炎は、混合気の燃料組成、燃焼速度、当量比、不活性ガス成分、 Le により種々の不安定モードを示すことがわかった。特に燃焼速度が増大すると火炎先端に規則的なセル構造が現れ、同時に急激な圧力振動を引き起こすことがわかった。この現象は、それに先だてて生じる管内の圧力変動(主にPressure couplingによる)に誘起される音響速度のもとで火炎先端形状が特定の変形を示すことがきっかけとなって進展することが示された。

研究成果の概要(英文)：Freely downward propagating flames in a one end closed combustion tube with diameter of 50mm were investigated as a fundamental of combustion instability in a gas turbine combustor. It was found that some different modes of combustion instability appeared depending on the fuel composition, burning velocity, equivalence ratio, composition of balance gas, and Le . Particularly combustion instability and resulting intense pressure fluctuation were found with presence of coherent corrugated structure at the propagating flame front. Such combustion instability could be caused by combination of primary pressure fluctuation induced by pressure coupling and presence of flame front disturbance.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 予混合火炎 音響振動 不安定現象 レーザ 乱流火炎 火炎曲率 ルイス数

1. 研究開始当初の背景

ガスタービン燃焼器（以下GT燃焼器）の開発において、最も困難な課題の一つが振動燃焼現象である。特に近年、燃焼器の低NO_x化や熱効率向上を目的として希薄予混合燃焼方式が注目されるようになり、この振動燃焼の抑制が大きな課題となっている。この現象が生じると、それにともない大きな圧力変動が生じこれが燃焼器の寿命を大きく縮め、時には燃焼器の破損に至る。現在産業界で取られている対応策は、燃焼室に適当なキャビティを設けて圧力変動を減衰させたり、燃焼器の構造を変えることで音響振動周波数を調整するといった対症的なものである。

この問題が容易に解決できない要因の一つは、火炎と音響振動が相互作用を持つメカニズムが必ずしも明らかにされていないことが挙げられる。振動燃焼に対しては、内部の圧力変動と燃焼による発熱の変動が同期し、Rayleigh の条件（圧力変動の発熱変動による加振が系のエネルギーロスによる減衰を上回る）が満たされることが前提なのであるが、ここで最も大きな学問的課題は、圧力変動と発熱変動がどのような機構により同期するかという点である。これに対する代表的研究はSearbyら[1]によるものである。彼らは、特定の先端曲率を持つ円管ダクト内伝播火炎が、任意の振幅や周波数をもつ音響振動に曝された時、火炎表面積に時間変動が生じ（つまり発熱も変動）、この結果Rayleigh の条件が満たされ、激しい燃焼振動に至ると考えた。しかし、彼らの研究では、対象とする系を発熱変動を加振力とするパラメトリック振動系として扱うことで不安定領域を求めているものであり、不安定領域の実験的特定がなされていないことや、また、安定領域から不安定領域への遷移の過程で何が起きているのか（例えば、曲率をもつ火炎先端構造の分裂や崩壊等）といった問いには答えてはいない。特に後者の点はGT燃焼器が振動燃焼を開始する際のトリガーとなる現象の議論そのものであり、実機における振動燃焼への遷移を抑制する手がかりにもなりうる。

一方で、本研究代表者はこれまでの研究において、燃料空気混合気中に赤外レーザー光を照射することで、伝播火炎前縁の曲率や振幅を任意に制御する手法を確立しており[2]、本研究では、この手法を用いて以下の目的に記載の内容について研究を行うこととした。

[1] Searby, G. and Rochwerger, D. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 231, (1991), pp. 529-543.

[2] J.S. Park, O. Fujita, Y. Nakamura, H. Ito, *Proc. Combust. Inst.* 33 (2011) 1105-1112.

2. 研究の目的

本研究では、当該申請者が開発したレーザー加熱火炎面曲率制御法により、予混合火炎伝播面の形状を任意に制御したうえで、その火炎と、GT燃焼器内で生じるような音響振動との相互作用を詳細に観察する。変形を伴う

火炎が音響振動場に曝され、初期構造が崩壊し発熱速度の急激な増大が生じる現象や、この発熱の時間変動と燃焼器内の圧力変動が同期し激しい音響振動を引き起こす過程を実験的に再現し、この現象のトリガーとなる最初の火炎構造の変化が何であるかを知ることが目的としている。

このために、まず対象とする火炎の不安定条件マップ（燃料種・混合気組成・Le・不活性ガス組成等を変数とする）を取得したのち、安定から不安定条件へ遷移する過程で生じる圧力振幅増大の機構について検討を加える。さらに、安定して伝播する火炎にレーザー加熱法による火炎変形を与え、それにより誘因される振動燃焼への遷移の観察を詳細に行う。これによりこの過程における遷移のトリガーと見なされる火炎構造の変化を見いだす。

3. 研究の方法

本研究では主に実験的な立場から研究を進めた。図1は本研究で使用した装置の概略図である。図中央に内径50mmの伝播管が垂直に設置されており、この伝播管の中心軸に沿って上方から下方に向かってCO₂レーザー（ビーム径3.3mm、波長10.6μm）を照射できるようになっている。伝播管上端には電磁石により上下動が可能な蓋が取り付けられており、これを任意のタイミングで開閉できる。また、下端は完全な閉鎖端となっており圧力変動を測定できるように圧力測定器が設置されている。この伝播管に上蓋を閉じた状態で任意の組成の混合ガスを封入する。そして管上端付近に設置されている点火装置で着火を行い、同時に上蓋を開放する。火炎は下方へ伝播するが、その際膨張したガスはそのまま開放端から排気されるため管内部の圧力はほぼ大気圧に保たれる。火炎伝播の様子は側面から2台の高速度カメラにより撮影する。なお、ここで伝播管の長さを実験上の変数となっており、長さ30~70cmの範囲で変化させることができる。図2は、管内伝播火炎に変形を与える原理を示したものである。多くの炭化水素は赤外領域に吸収波長を有する。この性質を利用し、赤外レーザー光を炭化水素燃料を含む予混合気中に既燃ガス側か

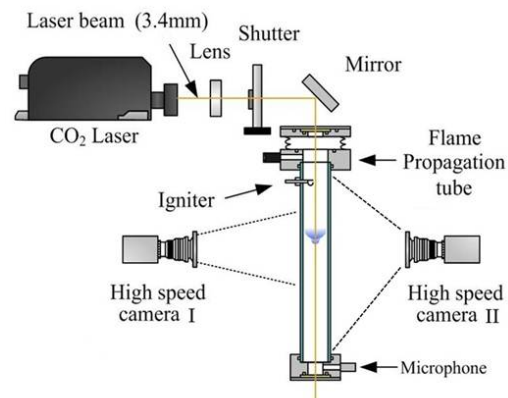


図1 実験システム概要

ら照射すると、未燃混合気側においてレーザー光の吸収が生じ局所的に温度上昇が生じる。この結果、局所的な燃焼速度の増大 ($S_{u0} \rightarrow S_{u1}$) が生じ、火炎に任意の変形を与えることができる。とくに、レーザー強度や照射時間、レーザービーム径を制御することで任意の変形を与えることができることから、火炎の初期変形がその後の不安定性の発展に及ぼす影響を観察するうえで有力な研究手段となる。

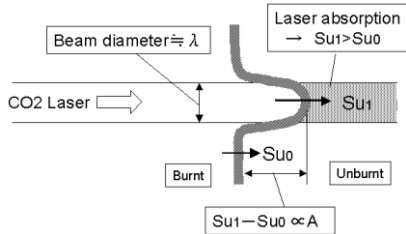


図2 レーザ加熱による火炎面曲率制御の原理

4. 研究成果

(1) レーザ照射無しでの管内火炎伝播挙動

まず、管内で生じる振動燃焼挙動の観察を行う。図3は伝播管に封入する予混合気の組成を変え燃焼速度が7.5~40cm/sの範囲で変化した際の管内火炎伝播挙動である。図においては、火炎が上端から下端へ伝播する途中の火炎形状を順次示している。この図から、火炎は燃焼速度の増加とともに以下のような燃焼挙動を順次示すことがわかる。

- I: 振動のない湾曲した火炎
- II: 振動のある湾曲した火炎
- III: 湾曲した火炎から平面火炎への遷移
- IV: 平面火炎から乱流状態への遷移
- V: 湾曲した火炎から直接乱流状態への遷移
- VI: 乱流状態から再安定化後、再び乱流状態への遷移

Iは全く圧力振動が生じない場合であり、II, IIIは安定した定常的な伝播挙動であるものの管内には振幅の小さな圧力変動が観察される。IV-VIは火炎面に乱れが生じ、それに伴い大きな圧力変動が生じ、この結果火炎面の規則的構造が失われ乱流状態となる。本研究でのこの状態を不安定振動燃焼と呼ぶ。

図4,5は、図3の中で、III, IV, VIの火炎について、管内の圧力変動を測定した結果で

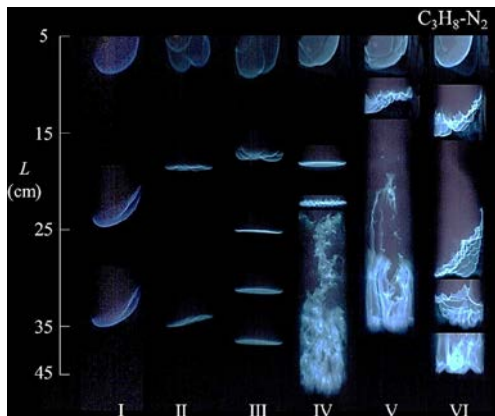


図3 予混合気を封入した管内の火炎伝播挙動 (C3H8/O2/N2 混合気, 当量比 $\phi=1.2$, 管長=50cm)

ある。圧力変動の測定は管の下端(閉鎖端)で行っている。いずれの場合も管内に一定の圧力変動が生じるが、火炎面に乱れが生じることなく平面火炎を保って伝播するIIIの条件では、図4に見られるように比較的穏やかな圧力増幅を示し、その圧力振幅は最大で0.5kPa以下である。一方、火炎面に乱れが生じると圧力振幅が急激に増加し、最大で8kPa程度の圧力振幅となる。

次に、上で観察した火炎の不安定挙動の発生状況を3種類の燃料に対して調査した。対象とした燃料は表1に示すとおりCH4, C2H4, C3H8の3種類であり、希釈ガスはN2とCO2の2種類、当量比は希薄条件($\phi=0.8$)と過濃条件($\phi=1.2$)について調べた。

図6~8は各燃料、当量比、および希釈ガス毎に各火炎挙動(I~VI)が現れる条件を示したものである。また図中の破線は、激しい燃焼振動により火炎が乱流状態へ遷移する境界を示している。これらの図から読みとれる特徴的挙動として、燃料によらず燃焼速度が大きくなると激しい燃焼振動状態へ遷移すること、N2とCO2希釈の場合を比較するとN2希釈の方がCO2希釈の場合と比べてよ

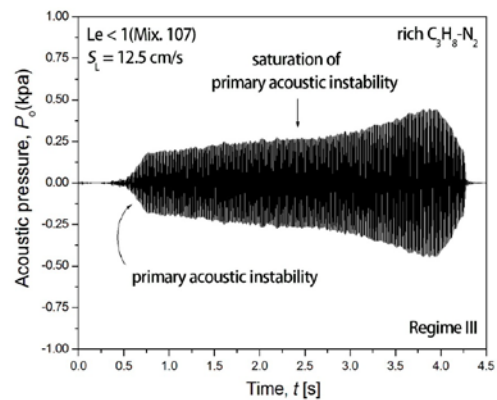


図4 IIIの条件に対する圧力増幅挙動 (当量比 $\phi=1.2$, 燃焼速度 12.5cm/s)

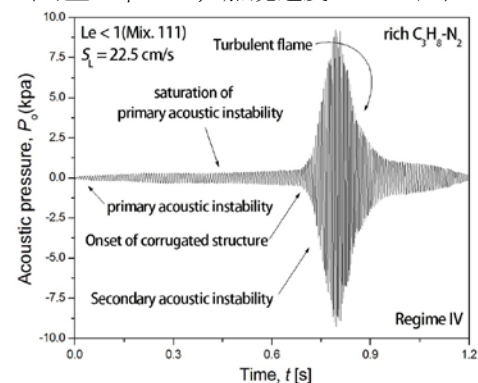


図5 IVの条件に対する圧力増幅挙動 (当量比 $\phi=1.2$, 燃焼速度 22.5cm/s)

表1 試験対象とした混合気条件

燃料	酸化剤	希釈ガス	当量比	層流燃焼速度
CH4	O2	N2 CO2	0.8 1.2	7.5 cm/s ~ (2.5
C2H4				cm/s ずつ増加)
C3H8				乱流への遷移まで

り大きな燃焼速度になるまで燃焼不安定が生じない（つまり N2 希釈の方が安定）であること、基本的に当量比が小さい方がより大きな燃焼速度になるまで燃焼不安定が生じない（つまり燃料希薄の方が安定）であることがわかる、ただし、CH4 を燃料とした場合だけは傾向が逆（過濃条件の方が安定）となっている。この両者の傾向は Le という指標で見ると、いずれも Le が大きい方が安定であると理解できる。このように、火炎の不安定挙動は燃料種、当量比、希釈ガス成分によって変化することがわかる。

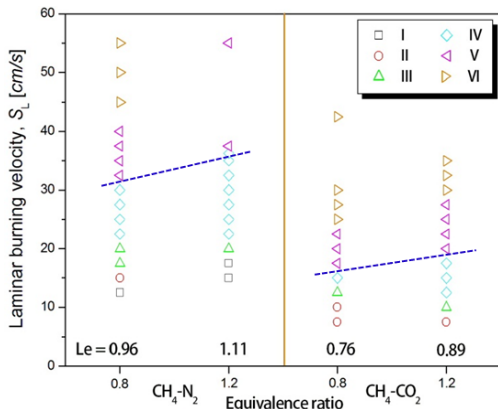


図 6 CH4 混合気に対する火炎挙動マップ

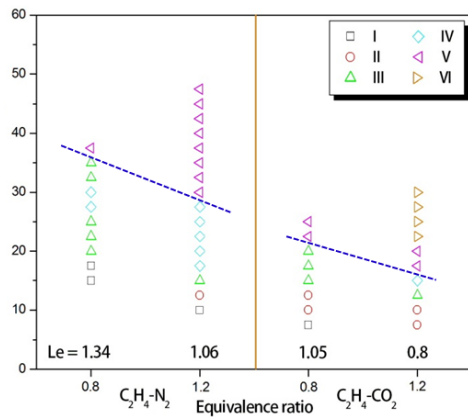


図 7 C2H4 混合気に対する火炎挙動マップ

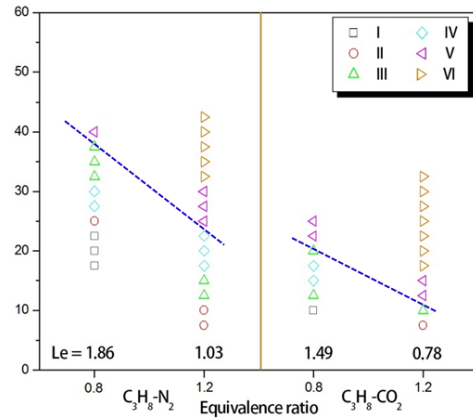


図 8 C3H8 混合気に対する火炎挙動マップ

(2) 不安定振動燃焼への遷移過程の観察

不安定振動燃焼への遷移は、図 5 に見られるように、まず最初に小さなレベルの圧力振

幅が生じ、それに引き続いて突然急激な圧力振幅の増大を引き起こす形で生じる。ここで、図 5 に見られる不安定振動燃焼は、その前に生じる比較的小さい圧力振動に引き続いて生じていることから、この初期の圧力振動が生じる機構について知ることは重要である。以下ではこの初期の圧力振動の発生する機構について検討を加える。

初期の圧力振動が生じる機構としては、2 つものが考えられる。一つは伝播管内で微小な圧力変動が生じた際、これに同期して火炎帯における反応速度が変動することによる圧力振幅の増大である。これは通常 Pressure coupling と呼ばれる現象で、圧力変動に伴う微小な温度変化が反応速度の変動を引き起こすことによるものである。もう一つの機構は、火炎面に曲率や変形が存在していると火炎面が圧力変動に曝された時、火炎表面積の変動を引き起こし、これが時間的な発熱変動を与えることによるものである。火炎面積の変動が圧力変動と同期すると、発熱変動も圧力変動と同期することになり、Rayleigh の条件が満たされ圧力変動の増幅が生じる。この機構は Velocity coupling と呼ばれる。このいずれの機構が原因となって初期の圧力振動が生じているかを調べるため、表 2 に示すような混合気組成に対し火炎伝播実験を行った。Case1-4, 17 については、外部からレーザを照射し、火炎面積を変化させたときの圧力振幅の増加を観察する実験も行った。つまり、Velocity coupling が初期の圧力振動の要因であるなら、火炎変形を付与はさらなる圧力振幅の増大につながるはずである。

図 9 は表 2 に示す Case1~4 の条件について火炎前縁の移動履歴を示したものである。Case1, 4 は一定の圧力振動が現れるが、Case2, 3 に関しては極めて小さな圧力変動しか現れない。次に図 9 で調べた 4 条件について、レーザ照射を行い火炎面に変形を与える実験を実施したところレーザ照射は局所的な伝播速度の増大を引き起こすものの、圧力振動の増大はほとんど見られなかった。

図 10 は一例として Case1 の混合気に 2W のレーザ照射を与えた場合の圧力波形を示している。レーザ照射により火炎面の変形は生じているが、圧力波形はほとんど影響を受け

表 2 試験対象とした混合気組成

Case	C ₂ H ₄	O ₂	CO ₂	N ₂	ϕ	S_L (cm/s)	T_b (K)	α (cm ² /s)	v (cm/s)	$1/\tau_{mix}$ (s ⁻¹)	βM	w/ or w/o laser	vibration or not
1	0.071	0.24	0.69		0.90	22	2049	0.13	0.10	8.2	0.012		O
2	0.040	0.14		0.82	0.84	22	1832	0.21	0.15	12.7	0.007	with laser (0, 6, 12, 18(W))	x
3	0.059	0.20	0.74		0.90	11	1814	0.13	0.09	8.1	0.005		x
4	0.049	0.18		0.77	0.84	40	2092	0.21	0.15	12.7	0.013		O
5	0.067	0.25	0.68		0.80	22	1988	0.13	0.10	8.2	0.010		O
6	0.063	0.27	0.67		0.70	22	1927	0.13	0.10	8.3	0.009		O
7	0.070	0.26	0.67		0.80	25	2049	0.13	0.10	8.2	0.012		O
8	0.069	0.29	0.64		0.70	29	2049	0.14	0.10	8.3	0.014		O
9	0.061	0.20	0.74		0.90	12	1851	0.13	0.09	8.1	0.006		x
10	0.063	0.21	0.73		0.90	14	1900	0.13	0.09	8.1	0.007		x
11	0.066	0.22	0.71		0.90	16	1951	0.13	0.09	8.2	0.008		O
12	0.068	0.23	0.70		0.90	19	2000	0.13	0.09	8.2	0.010		O
13	0.041	0.15		0.81	0.84	22	1850	0.21	0.15	12.7	0.007		x
14	0.043	0.15		0.81	0.84	26	1900	0.21	0.15	12.7	0.008		x
15	0.044	0.16		0.80	0.84	29	1950	0.21	0.15	12.7	0.009		x
16	0.046	0.16		0.79	0.84	32	2000	0.21	0.15	12.7	0.010		O
17	0.090	0.20	0.71		1.35	12	1817	0.13	0.09	8.1	0.004	with laser during 60 ms (0, 14(W))	O

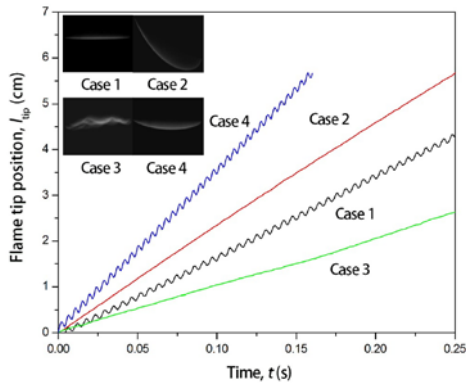


図 9 Case1-4 に対する火炎伝播挙動

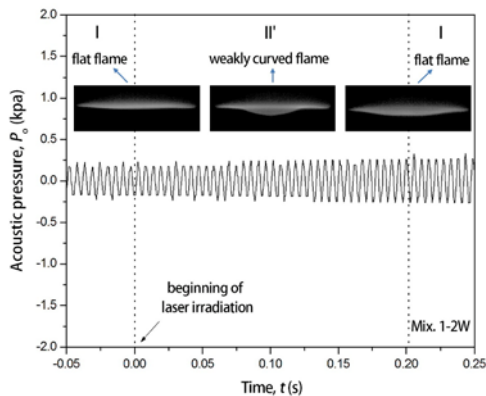


図 10 火炎変形が圧力波形に及ぼす影響

ていない。これらの結果から、火炎の変形は初期の圧力変動増幅にはほとんど影響を与えておらず、ここでは Velocity coupling は主要な機構でないことが示唆された。

一方、初期の圧力振動生成が Pressure coupling によるものだとすると、これは圧力変動による微小な温度変動が反応速度に影響を与えることにより引き起こされることから、その増幅率は反応の活性化エネルギー（無次元活性化エネルギー β ）および燃焼速度（無次元燃焼速度 M ）に強く依存することが理論的に予測される。そこで、初期の圧力振動に対して与えられる音響エネルギーの平均値と 2 つの変数の積 βM の関連性を調べた。図 12 に示すように、圧力変動の増幅にともなう音響エネルギーは βM にほぼ比例するように増大する。これらの事実から、

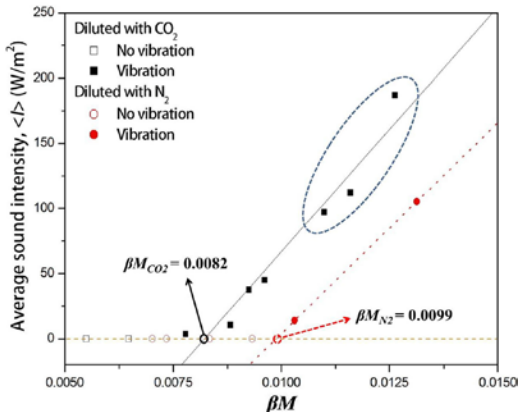


図 11 初期の圧力増幅に対する βM の影響

初期の圧力変動はほぼ pressure coupling に支配されていると考えることができる。

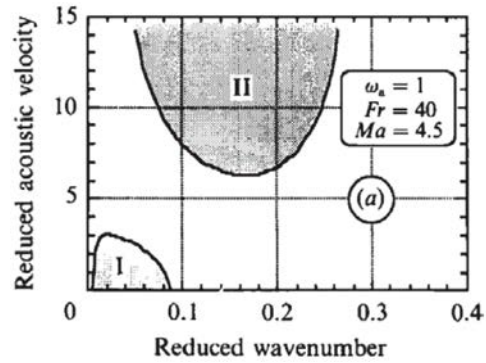


図 12 Searby による不安定ダイアグラム [1]

(3) 不安定振動燃焼のトリガー機構の検討

前節において、急激な圧力増幅を伴う不安定振動現象が生じる前に、Pressure coupling により引き起こされた圧力変動が生じていることがわかった。そのような場で、急激な圧力変動がどのように引き起こされるかを考察する。図 12 は Searby らにより提示された不安定ダイアグラムである。横軸が火炎先端の変形波数 ($2\pi/\lambda$, λ : 火炎変形の波長)、縦軸が音響速度（圧力変動の振幅により決まる値）である。図の縦軸は前節で議論したように、Pressure coupling により生じた圧力変動に対応して与えられる。したがって、管内伝播火炎で特に Le が小さい条件においては、常にある程度の音響速度が生じていると言える。この図において、II で示される領域がいわゆるパラメトリック不安定の領域である。この領域は、一定の波数をもつ火炎面が圧力変動により前後に揺すられることにより火炎先端に不安定性が現れるとするものである。そこで、図中の安定領域（白地の領域）から II の不安定領域へ強制的に遷移させる実験を行う。図 13 はその結果の一例で、平面状に伝播する火炎にレーザを照射することで火炎に曲率の大きな変形を与えている (72ms)。この変形を与えた後、火炎先端が特有の形状を持ちながら成長してゆく (103ms)。この火炎が有る程度時間を経過すると先端に窪みのような凹型の変形が生じる (106ms)。この変形が生じると、この変形が左右に伝播し表面に規則的なセル構造を持つようになる (114ms-129ms)。図 14 はこの変形に対応した圧力変動の図である。約 100ms までは圧力振幅の増幅はほとんど観察されない。しかし、先端に凹の形状が現れたタイミングと呼応して圧力変動の急激な増幅が生じることがわかる。この後は急激に圧力の増幅が生じ、火炎先端の規則構造が壊れ乱流状態へと遷移する。

この結果から、火炎先端が一定の圧力変動に曝され、それによる音響速度が図 12 で示すような不安定領域（領域 II）へ入ると、火炎先端に特定の変形が生じ、これが図 13 で見られるような規則的セル構造の形成につ

ながら、これが大きな圧力の増幅につながっていると考えられる。

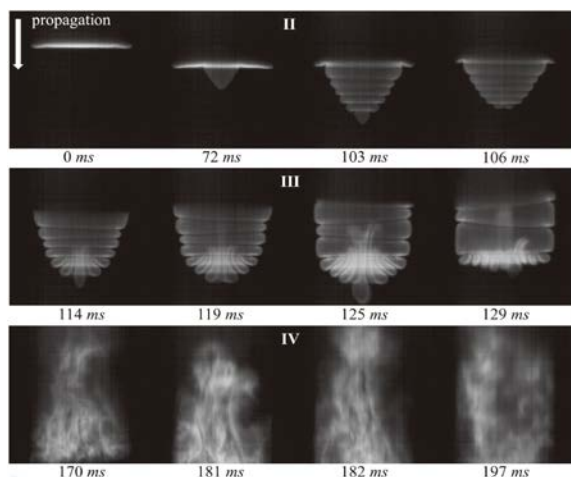


図 13 レーザ照射により大きな曲率の変形を与えた際の先端に生じる不安定構造

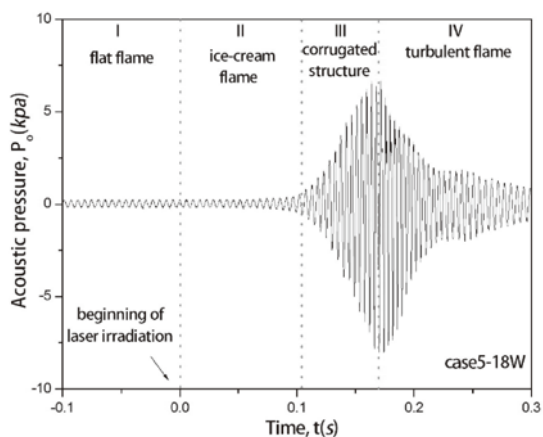


図 14 不安定領域へ遷移した際の圧力波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

1. Sung Hwan Yoon, Longhua Hu, Osamu Fujita, Experimental Observation of Pulsating Instability under Acoustic Field in Downward-Propagating Flames at Large Lewis Number, *Combustion and Flame*, Vol.188, (2018-2), Pages 1-4. (査読有)
2. Sung Hwan Yoon, TaeJoon Noh, Osamu Fujita, Effects of Lewis number on generation of primary acoustic instability in downward-propagating flames, *Proc. Combustion Institute*, Vol.36, (2017-1), Pages 1602-1611. (査読有)
3. Sung Hwan Yoon, TaeJoon Noh, Osamu Fujita, Onset Mechanism of Primary Acoustic Instability in Downward-Propagating Flames, *Combustion and Flame*, Volume 170, (2016-8), Pages 1-11. (査読有)
4. 藤田 修, Sung Hwan Yoon, 谷山由和, レーザ加熱法を用いた管内伝播予混合火炎の不安定性の研究, 日本燃焼学会誌, Vol.57, No.181, (2015-8), pp.174-182. (査読有)
5. Kira Aguilar, Yoshikazu Taniyama, Hiroyuki Ito, Osamu Fujita, Interaction between Propagation Speed and Flame Structure in Downward Cellular Propagating Flame in a Combustion Tube with CO₂ Laser Irradiation, *Combustion Science and Technology* Vol.186,(2014-9), pp.1434-1446. (査読有)
6. Yoshikazu Taniyama, Osamu Fujita, Initiation and Formation of the Corrugated Structure Leading to the Self-turbulization of Downward Propagating Flames in a Combustion Tube with External Laser Absorption, *Combustion and Flame*, Vol.161, Issue 6, (2014-6),

pp.1558-1565. (査読有)

〔学会発表〕 (計 11 件)

1. Dubey Ajit Kumar, Yoichiro Koyama, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita, Effect of Geometrical Parameters on Thermo-acoustic Stability of Downward Propagating Flames in Tubes, 第 55 回燃焼シンポ, 富山, 2017.11.13.
2. Yongho Chung, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita, Transition to Secondary Acoustic Instability induced by External Laser Irradiation in a Tube, 第 55 回燃焼シンポ, 富山, 2017.11.13.
3. Taejoon Noh, Sung Hwan Yoon, Osamu Fujita, A Study on the Effect of Propagation Direction on Onset of Primary Acoustic Instability by Comparing Downward and Upward Propagating Premixed Flames in a Tube, 第 54 回燃焼シンポ, 仙台, 2016.11.23.
4. Taejoon Noh, Sung Hwan Yoon, and Osamu Fujita, The Comparative Study of Acoustic Instability of Downward and Upward Propagating Flames in a Tube, 36th International Symposium on Combustion, Work-in Progress (Poster presentation), Seoul, Korea, 2016.8.1.
5. Sung Hwan Yoon, Taejoon Noh and Osamu Fujita, Effects of Lewis number on acoustic instability of freely propagating flames in a tube, International Symposium on Thermo acoustics in Gas Turbines and Rocket Engines, Munich, Germany, 2016.5.30.
6. Sung Hwan Yoon, Taejoon Noh, Osamu Fujita, Effect of Lewis number on Acoustic Instability in a Combustion Tube, Conference of PRTEC 2016, Kauwai, Hawaii, USA, 2016.3.14.
7. Taejoon Noh, Sung Hwan Yoon, Osamu Fujita, Effects of Lewis number on Acoustic Instability of Upward Propagating Premixed Flames in a Combustion Tube, 第 53 回燃焼シンポ, つくば, 2015.11.16.
8. Taejoon Noh, Sung Hwan Yoon, Osamu Fujita, Effect of Lewis number on Acoustic Instability of Upward Propagating Ethylene Flames, KOSCO meeting, Seoul, Korea, 2015.5.21.
9. Sung Hwan Yoon, Osamu Fujita, Effects of Variation of the Flame Area and Natural Damping on Primary Acoustic Instability of Downward Propagating Flames in a Tube, 25th The International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS2015), , Leeds, UK, 2015.8.3.
10. Osamu Fujita, Yoshikazu Taniyama, Interaction between Acoustic Vibration and Propagating Flames Deformed by External Laser Irradiation in a Combustion Tube, The 5th East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop, Seoul, Korea, 2015.5.28.
11. Sung Hwan Yoon, Osamu Fujita, A Study on Effects of Thermal Diffusion and Burning Velocity in Acoustic Instability, 第 52 回燃焼シンポ, 岡山, 2014.12.3.

〔図書〕 該当なし

〔産業財産権〕 該当なし

〔その他〕 ホームページ等 <http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/lisu/project/acoustic-instability>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 藤田 修 (FUJITA OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10183930

(2) 研究協力者

ユン サンファン (YOON SUNG HWAN)

北海道大学・大学院工学院・DC 学生

ノ テジュン (NOH TAEJOON)

北海道大学・大学院工学院・MC 学生