

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360090

研究課題名（和文）レーザ加熱法を用いた火炎面曲率制御による Flame Dynamics の研究

研究課題名（英文）Study on Flame Dynamics of Premixed Flames with Controlled Curvature by Laser Irradiation Method

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

研究成果の概要（和文）：レーザ加熱法により平面予混合火炎に任意の曲率を与え、その後の火炎面不安定現象の進展の観察を行った。まず開放型平面火炎バーナを用い、ルイス数(Le)の異なる2種類の混合気についてこの実験を行ったところ、火炎変形の拡大（Growth rate）が Le に影響を受けることを明確にした。また、火炎伝播管を用いた実験では、本法により変形を与えた火炎と管内に形成される音響振動場の相互作用を観察し、火炎の不安定化および自己乱流化現象発生の可否が、本研究で新たに定義したフルード数（Pulsating Froude Number）Gp により整理できることを示した。

研究成果の概要（英文）：Evolution of flame instability of premixed flame with a given initial curvature by external laser irradiation method was investigated. At first the method was applied to open flat flame burner and the effect of Lewis number (Le) on the growth rate of curved flame was experimentally revealed. The growth rate was apparently larger with lower Le. In experiments with propagation tube, the interaction between acoustic field and curved flame was investigated. As a result of the investigation, non-dimensional number, Pulsating Froude Number, Gp, was newly defined in the present work and it was concluded that the criterion of self-turbulization in acoustic field could be given by the non-dimensional number.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

平面燃焼波が乱れのある流れ場に置かれると、流れの流体力学的構造に対応した変形を受ける。このとき、火炎帯の幾何学的形状（曲

率)が燃焼物理に影響を与えないのであれば、流れ場の中に存在する火炎は、混合気組成により決まる燃焼速度と火炎表面積の増大に基づき取り扱うことが可能になり、大規模な乱

流予混合燃焼の数値シミュレーションにおける燃焼部分の取り扱いは格段に容易になる。これが、LESなどにおいて最も一般的に行われているアプローチでもある。

しかし、実際には火炎の幾何形状が燃焼現象そのものに影響を与え、局所的に火炎伝播速度が変動する不安定性や、時には消炎現象を引き起こし、これが、例えばガスタービンの火炎安定性(振動燃焼や火炎吹き消え)や、希薄燃焼時あるいは高乱流強度条件でのエミッションに影響を与える。このため、火炎幾何形状と燃焼現象の相互関係を明らかにすることは極めて重要である。しかし、従来は伝播中の火炎の変形を任意に制御することが難しく、理論的研究の進展に比較し実験的研究の進展は十分とは言えなかった。

本研究では、当該研究者らが新たに開発したレーザ照射法により、伝播火炎前縁の変形を任意に制御する手法を用いて、火炎の曲率と燃焼物理の相互関係を調べた。

## 2. 研究の目的

本研究では、レーザ照射による火炎曲率制御法を用いて、従来実験的に調べるのが難しかった火炎曲率と燃焼物理の相互関係を系統的に調べて行くことを目的とする。とくに、(1)火炎曲率と不安定性の相互関係、(2)変形を受けた火炎の音響振動場における不安定挙動、(3)浮力影響に起因する不安定挙動、について研究を行う。本報告では、とくに重点を置いた(1)、(2)について述べる。

## 3. 研究の方法

本研究は、主に実験的アプローチにより研究を進めた。使用した装置は、(1)開放型バーナ実験装置および(2)伝播管型実験装置である。図1は、開放型バーナ実験の系統図である。組成を任意に調整した予混合ガス

を整流後に下向きに噴出し、下方におかれたセラミック平板に吹き付ける。これにより、平板上によどみ流が形成され、燃焼速度と局所流速が釣り合う位置に平面状火炎が形成される。このようにして形成した平面状火炎に対し、図2に示すような概念で下方から上方に向かってCO<sub>2</sub>レーザを照射する。照射したレーザは、予混合気中の燃料成分により吸収され局所的に燃焼速度が変化し、火炎が変形する。本研究では、この照射レーザの強度および照射時間を制御することで、火炎の初期変形を任意に制御し、その後の火炎形状の時間変化を調べる実験を行った。

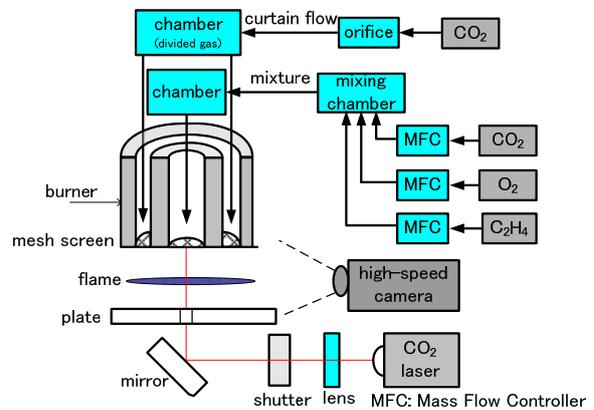


図1 開放型バーナ装置の系統図

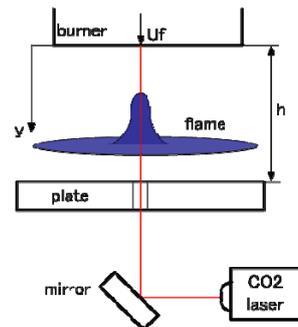


図2 レーザ照射法の概念図

使用した2つ目の装置は、図3に示す伝播管型実験装置である。この装置は、燃料および空気の混合気を内径5cm、長さ45cmの透明なアクリル管に封入し、その上端に着火した後の火炎伝播挙動を観察するものである。伝播管上端は電磁石により開放可能となって

いる。予混合気に着火を行う直前に上端を開放し、火炎伝播が進展している過程で管内部の圧力上昇が生じないようにしている。この装置において、特定条件で火炎伝播を行うと、ほぼ完全な平面火炎を形成できる。この平面火炎に上方からレーザを照射し、火炎に任意の変形を与えることができる。この変形した火炎の不安定挙動の進展を観察する。

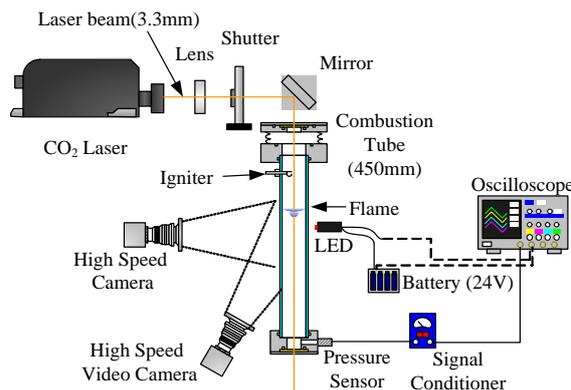


図3 管内火炎伝播実験装置の概要

#### 4. 研究成果

##### 4.1 火炎曲率と不安定性の相互関係

図1に示す実験装置により、混合気組成が火炎形状の時間変化に及ぼす影響を調べた。対象とした混合気は、表1に示す燃料過濃および希薄ガスの2種類である。燃焼速度はいずれも20cm/s程度であるが、この両者は平板上に平面火炎を形成した際に火炎位置が同じになるよう調整したもので、両者の燃焼速度はほぼ等しいものと考えてよい。

表1 測定対象とした混合気組成

	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	$\phi$	Le
Rich	9.5%	19.5%	71%	1.46	0.83
Lean	5.37%	23%	71.63%	0.70	1.12

CO<sub>2</sub>レーザの具体的照射方法は、ビーム径を3.4mmに固定し、出力は燃料過濃条件では3.0W、燃料希薄条件では5.1Wとして照射した。この照射条件はBeerの法則を用いて、両混合気条件でレーザ光吸収量がほぼ同じ0.6W程度となるように設定している。

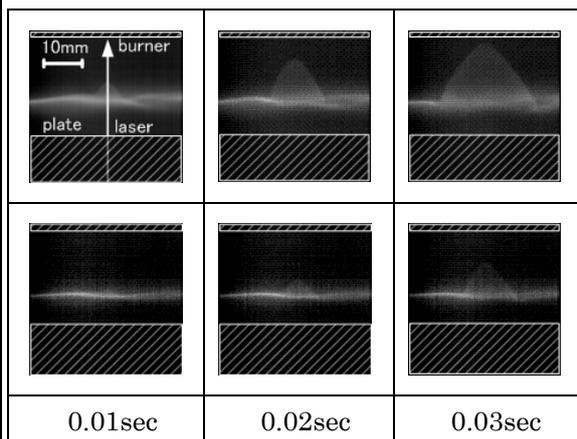


図4 レーザ照射開始後の上方伝播火炎(照射時間0.1秒,上段: fuel rich, 下段: fuel lean)

図4にレーザ照射開始からの各時刻の火炎画像を示す。上段は燃料過濃条件、下段は燃料希薄条件の画像である。両条件ともレーザが照射された箇所が局部的に凸型となり、火炎先端が上流へ向かって急速に伝播する様子が観察された。この局所変形はレーザ軸の未燃部に存在するエチレンがレーザのエネルギーの一部を吸収し、温度を上昇させ、局部的に燃焼速度が増加するために起きる。2種類の混合気に対しレーザの吸収量が同程度となるよう調整しているにもかかわらず、火炎先端の移動速度に明らかな違いが見られる。図5にレーザ照射時の火炎先端位置の時間履歴を示す。横軸の時刻はレーザ照射開始を0秒とし、縦軸の火炎先端位置は下部の平板表面を0mmとした。この結果火炎先端の伝播速度は燃料過濃条件のほうが明らかに大きい。燃焼速度、レーザ加熱条件等、の条

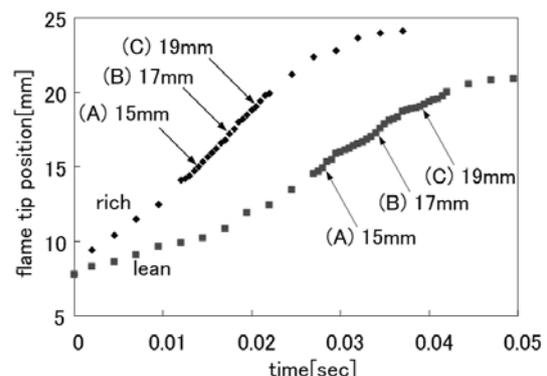


図5 レーザ照射後上流へ伝播する火炎先端の時間履歴(照射時間0.1秒)

件を可能な限り同じにしており、 $Le$ (レイス数)のみがこの両者で異なる条件である。すなわち、 $Le$ の違いが火炎の成長速度の違いを与えていると考えられ、本手法により $Le$ の不安定性への影響を観察可能であることがわかる。

#### 4.2 変形した火炎の音響振動場不安定挙動

図3に示した管内火炎伝播実験装置により、変形を受けた火炎と音響振動場の相互作用による不安定性の進展について検討した。表2は本実験で選択した混合気組成である。このうち、混合気Aの火炎にレーザー強度18Wで連続照射した結果を図6に示す。最初混合気Aを伝播させると平面火炎が形成されるが、ここに $CO_2$ レーザーを照射すると局所的に火炎が変形しこれが大きく成長していく。その後、その変形がある値を超えると、先端に凹形状(負の曲率)が現れる。さらにそれに引き続いて先端が規則的な波状の火炎(Corrug

表2 伝播管実験で使用した混合気組成

Label	$C_2H_4$	$O_2$	$CO_2$	$\Phi$	$Le^*$	$S_L$	$\Delta$
A	9%	21%	70%	1.29	0.794	25.1cm/sec	0.0052cm
B	9%	20%	71%	1.35	0.791	20.3cm/sec	0.0064cm
C	7%	22.5%	70.5%	0.93	1.045	25.0cm/sec	0.0052cm

%: Volume percent,  $\Phi$ : Equivalence ratio,  $Le^*$ : Lewis number,  $S_L^*$ : Laminar flame speed,  $\delta^*$ : Flame thickness ( $=D_{th}/S_L$ )  
 $D_{th}^*$ : Thermal diffusivity \* Calculated by CHEMKINpro (GRI-Mech3.0)

表2 伝播管実験で使用した混合気組成

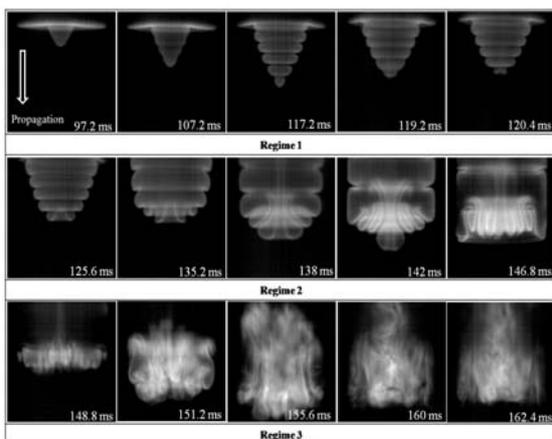


図6 レーザ照射による火炎変形に起因する不安定性の進展の例 (18W, 連続照射)

gated structure) を示し、この後、火炎先端の規則的な構造は失われ乱流燃焼状態へ移行するという興味深い結果が得られた。このような火炎の不安定化に起因する乱流状態への遷移の可否は、レーザーの照射条件により分かれる。図7はその例で、図中○印のプロットが遷移条件であり、×印は遷移しない条件である。この図から分かるように、レーザー強度を固定した場合は一定以上の照射時間で遷移が生じ、照射時間を固定して考えた場合は照射強度が一定以上で遷移が生じる。

次に、このような遷移現象発生の可否が決定される機構について考察を行った。その結果、レーザーの照射条件は火炎の初期変形を決定することから、初期変形が遷移発生の可否を決定すると考えた。この時、火炎変形を代

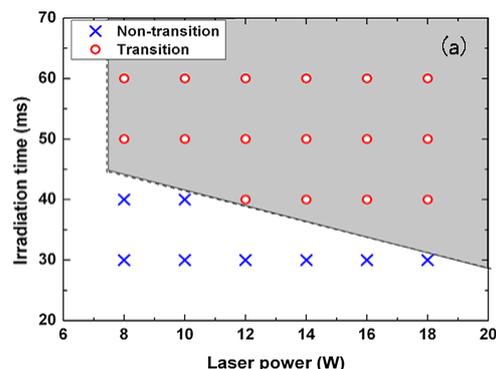


図7 遷移を与えるレーザー照射条件

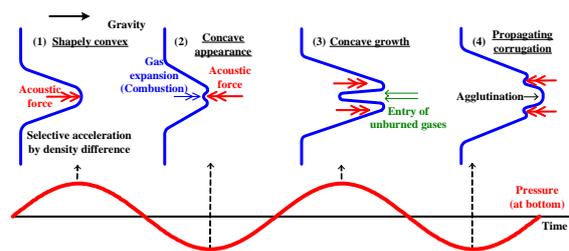


図8 曲率を持つ火炎が不安定化する機構

表寸法に取り、管内音響振動により与えられる加速度条件に基づく Froude 数が重要な因子になる。それは、図8に示すような変形火炎先端の構造が加速度により負の曲率を持つ過程が遷移のトリガーになると考えられ

るからである。そこで、この不安定性が発生する条件を与えるパラメータとして下記により定義される Froude 数( $G_p$ )を導入する。

$$G_p = 2\pi \omega U_a H / S_L^2$$

ここで、 $\omega$  は音響振動周波数(Hz)、 $U_a$  は音響速度(cm/s)である。 $\omega$  は本実験において実測された値 (175Hz) を用いた。 $U_a$  は音圧から未燃ガスの一端開放管の1次振動モードを仮定して決定される火炎先端位置における音響速度で与えた。また、 $H$  は火炎変形の軸方向長さ、 $S_L$  は燃焼速度である。ここで与えた Froude 数は、本研究により初めて定義されたもので、Pulsating Froude number ( $G_p$ ) と呼ぶこととする。

図9に混合気Aおよび混合気Bに対しレーザー照射条件を変えた各実験で得られた  $G_p$  を示す。図では横軸に照射時間を取り、プロットの形状でレーザー出力を示し、縦軸に  $G_p$  をとった。また、図のグレー部分上のプロットは乱流状態へ遷移する場合を、白い部分上のプロットは遷移しない場合を示す。図からレーザー出力および照射時間に比例して  $G_p$  が増加する傾向が両混合気において確認できる。しかしながら、レーザー出力もしくは照射時間の片方を固定しても遷移しない場合とする場合が存在するため、遷移がどちらか一方で決定されるわけではないことがわかる。一方、Froude 数  $G_p$  においては臨界値が 50~55 付近に存在し、両混合気においてその値は一致した。従って、レーザー照射条件や混合気によらずここで調べた範囲では  $G_p$  が臨界値を越えると乱流への遷移することが示された。さらに  $Le$  の異なる混合気組成 (混合気 C) に対しても比較実験を行った。この場合も、 $Le$  によらず遷移の臨界  $G_p$  は同様な値となり、Pulsating Froude number  $G_p$  が遷移の臨界条件を与える無次元数となることが示唆された。

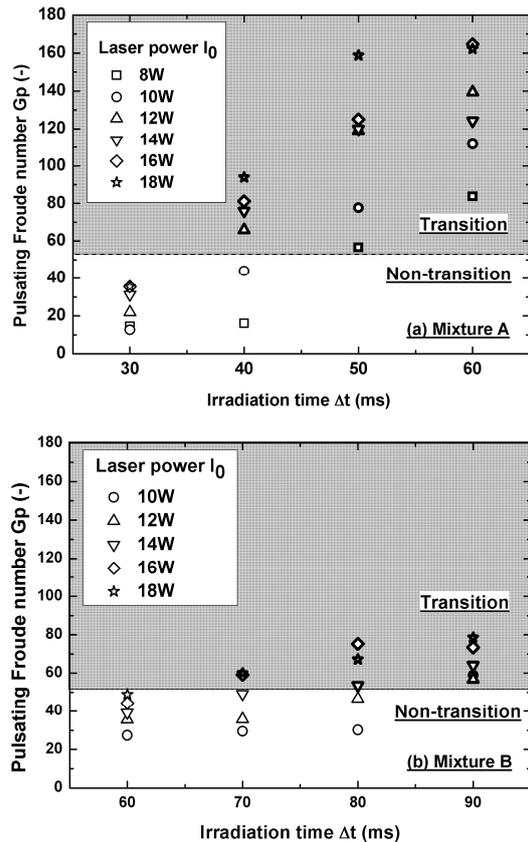


図9 レーザ照射時間に対する無次元数  $G_p$  の変化と乱流遷移発生条件 (上: 混合気 A, 下: 混合気 B)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

①Park, J.S., Fujita, O., Nakamura, Y., Ito, H., Transition of Flat Flames to Turbulent Motion Induced by External Laser Irradiation, Proc. Combustion Institute Vol.33, Issue 1, (2011), pp.1105-1112. (査読有)

②ark, J.S., Fujita, O., Honko, T., Yamada, Y., Nakamura, Y., Ito, H., Phenomena in oscillating downward propagating flames induced by external laser irradiation method Experimental Thermal and Fluid Science, 34 (2010)1290-1294. (査読有)

[学会発表] (計17件)

①Kira, A., Taniyama, Y., Ito, H., Fujita, O., Interaction between propagation speed and flame structure in downward cellular propagating flame in a combustion tube with CO2 laser irradiation, 24th Int. Conference on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, National Central Univ. (Taipei, Taiwan) (2013.7.30).

②谷山由和, 藤田 修, 外部レーザー加熱を伴う管内下方伝播火炎の乱流挙動への遷移条件, 第50回伝熱シンポ, ウェスタンホテル仙台 (仙台) (2013.5.30)

③Kira, A., Taniyama, Y., Ito, H., Fujita, O., Competition between buoyancy effects and propagation speed on flame structure in downward cellular propagating

flame in a combustion tube with time controlled CO<sub>2</sub> laser irradiation, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, Gyeongju Hilton Hotel (Gyeongju, Korea),(2013.5.20)

④Kira,A,谷山由和,伊東弘行,藤田修, Transient Deformation of Downwards Propagating Cellular Structure Flame in a Combustion Tube with External Laser Irradiation, 第50回燃焼シンポ, 愛知県産業労働センター(名古屋)(2012.12.5)

⑤谷山由和,伊東弘行,藤田修,外部レーザ加熱を伴う管内下方伝播火炎と音響振動の相互作用”, 第50回燃焼シンポ, 愛知県産業労働センター(名古屋)(2012.12.5)

⑥Kira,A, Taniyama,Y., Ito, H., and Fujita, O., Study of Cellular Structure of Downward Propagating Premixed Flame in a Combustion Tube, Work-In Progress Poster Colloquium at 34th Int. Symp. on Comb., Warsaw University of Technology (Warsaw, Poland), (2012.8.1).

⑦Taniyama, Y., J.S.Park, and Fujita, O., Initiation of the corrugated structure in downward propagating flame in a combustion tube with external laser, Work-In Progress Poster Colloquium at 34th International Symposium on Combustion, Warsaw Univ. of Technology (Warsaw, Poland), (2012.8.1).

⑧谷山由和, 朴俊成, 藤田修 外部レーザ加熱を伴う管内下方伝播火炎における波状火炎の形成、第49回燃焼シンポ,富山国際会議場(富山)(2012.5.31).

⑨高木一成, June Sung PARK, 伊東弘行, 中村祐二, 藤田修, "レーザ照射により曲率を与えた予混合火炎の非定常変形挙動に関する研究", 第49回燃焼シンポ, 慶應義塾大学(横浜), (2011.12.6).

⑩Osamu Fujita, June Sung Park, Yoshikazu Taniyama, Transition from Laminar to Turbulent Flame Induced by Laser Irradiation Method in a Propagation Tube, 8<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics, Tohoku University (Sendai). (2011.11.9)

⑪Park, J. S., Fujita, O., Taniyama, Y, Determination of the transition threshold from laminar flat flames to turbulent flames by a CO<sub>2</sub> laser irradiation method", Proc. 23rd International Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems (23rd ICDERS), University of California at Irvine (Irvine, USA) (2011.7.26), R4B-51 (on USB)

⑫Park, J. S., Fujita, O., Ito, H., and Nakamura, Y., Active Induction of the Transition from Hydrodynamic

to Primary Acoustic Instability by CO<sub>2</sub> Laser Irradiation", Proc. 8th Asia-Pacific Conference on Combustion, Taramati Baradari Cultural Complex (Hyderabad, India), (2010.12.13).

⑬Takagi, K., Park,J.S., Nakamura,Y., Ito, H., and Fujita, O.,Dynamic Behavior of Premixed Flame distorted by Laser Irradiation, Work-In Progress Poster Colloquium at 33rd Int. Symp. on Comb., Tsinghua University, (Beijing, China), (2010.8.3).

⑭Park,J.S, Fujita,O., Honko, T., Yamada, Y., Ito, H., Y.Nakamura, Transition Phenomena of Downward Propagation Flames in a Tube induced by External Laser Irradiation, 第47回燃焼シンポ演論文集, 札幌コンベンションセンター(札幌), (2009,12.3).

⑮Park,J.S., Fujita,O., Nakamura,Y., Ito H., Dynamic Behavior of Oscillating Flame Fronts in a Combustion Tube Induced by External Laser Irradiation, Proceedings of KOSCO, Seoul National University (Seoul, Korea), (2009.11.30).

⑯Park, J. S., Fujita, O., Honko, T., Yamada, Y., Ito, H., and Nakamura, Y., Some Features of Oscillating Downward Propagation Flames Induced by External Laser Irradiation, Proc. 21st International Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems, Minsk City Hall (Minsk, Belarus), (2009.7.30).

〔図書〕(計0件)  
該当なし。

〔産業財産権〕  
該当なし

〔その他〕  
ホームページ  
<http://york-me.eng.hokudai.ac.jp/researches/2012/FlameInstability/index-e.htm>

## 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) 研究分担者

中村 祐二 (NAKAMURA YUJI)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：50303657

伊東 弘行 (ITO HIROYUKI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：30372270