

機関番号：13102  
研究種目：基盤研究 (C)  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20560181  
研究課題名 (和文) 安全確認型の燃焼診断手法によるマルチマイクロフレームの  
スマートコントロール  
研究課題名 (英文) Smart control of multi-micro flames by combustion diagnostics  
with safety reporting type  
研究代表者  
門脇 敏 (KADOWAKI SATOSHI)  
長岡技術科学大学・大学院技術経営研究科・教授  
研究者番号：20185888

研究成果の概要 (和文)： 本論文では、バーナー上に形成されるマルチマイクロフレームを取り扱い、安全確認型の燃焼診断手法を用いてスマートコントロールする術を調べた。ここでは、3, 7, 19 本のステンレスチューブによる三つのタイプのマルチマイクロバーナーを用意した。予混合火炎の発光強度の時間履歴を測定し、その二乗平均平方根を求め、平均値で標準化した発光ゆらぎのパワースペクトル密度を求めた。得られた二乗平均平方根は流量とバーナーのタイプに依存し、当量比が大きくなると共に増大した。低周波数域において  $1/f$  スペクトルが観測され、当量比が充分大きいときにはパワースペクトル密度に鋭いピークが見られた。加えて、発光ゆらぎに関する時間履歴解析を行い、アトラクターを求め、予混合火炎のゆらぎの特性を調べた。アトラクターはトーラス状であり、それゆえ予混合火炎の挙動は準周期的であることが明らかになった。

研究成果の概要 (英文)： In this paper, we treated multi-micro flames on burners to study the smart control by combustion diagnostics with safety reporting type. We prepared three types of multi-micro burners, where 3, 7, or 19 stainless tubes were adopted. The combustible range of premixed flames on 19 burners was wide compared with 3 and 7 burners. We measured the time series of brightness intensity of premixed flames and obtained the root mean square, RMS, and power spectrum density of the brightness fluctuation normalized by its average value. The obtained RMS depended on the flow rate and on type of burner and increased by increasing the equivalence ratio. The  $1/f$  spectrum was observed in low frequency range, and the sharp peaks of power spectrum density were found at sufficiently large equivalence ratios. In addition, we performed the time series analysis on the brightness fluctuation, and also obtained the attractor to study the characteristics of the fluctuation of premixed flames. The attractors were similar to the torus, and then the behavior of premixed flames was quasi-periodic.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

環境問題がグローバルな観点から脚光を浴びている中、二酸化炭素の低減に結び付く水素とメタンの燃焼が、低環境負荷のエネルギー供給源として注目されている。化石燃料・バイオマスの水素改質技術が改良され、天然ガス・メタンハイドレートの掘削技術が進展すれば、今後、石炭・石油から水素・メタンへの大規模なエネルギーシフトが生じると考えられている。

低環境負荷エネルギーである水素とメタンは、超小型マシンのパワー源としても用いられる。超小型マシン用の発電システムは、マイクロフレームと燃料電池を組み合わせることにより、構築することができる。特に、マルチマイクロフレームを採用すると、マルチ電源を確保できるので、目的に合う電圧・電流を供給することが容易である。つまり、超小型マシンの駆動状況に合わせた電気エネルギーの供給が可能になる。そのため、マルチマイクロフレームを用いた発電システムは、多種の超小型マシンに適用でき、その応用例は非常に幅広いものになる。そして、新しい燃焼技術の一つになることが期待される。

研究代表者らは、マルチマイクロフレームの特性を、火炎からの発光強度のカオス時系列解析を用いて診断し、火炎変動のメカニズムを明らかにしている。ここで用いられている燃焼診断手法は、本質的に危険検出型である。危険検出型とは、危険であることを検出して、この危険情報により機械の行動を止めるものである。このタイプでは、何らかの故障により危険情報が伝わらない場合、危険であるにも拘らず安全であると誤認する虞がある（危険側故障）。つまり、危険検出型には安全が必ずしも確保できないという重大な欠点がある。

水素とメタンの燃焼プロセスにおいて、最も配慮すべき点はシステムの安全確保である。これまでに、安全を確保するための技術が数多く開発されている。しかし、従来の技術の多くは危険検出型であるので、システムの安全は必ずしも確保することができない。従って、十分な安全を構築するための何らかの手法を導入する必要がある。

## 2. 研究の目的

安全を確保する手法として安全確認型が提案されている。これは、安全情報によるインターロックシステムである。安全確認型とは、安全であることを確認して安全情報を受

け取るときのみ、実際の行動命令を発して作業を続行するものである。安全を確認するセンサーの故障や情報を伝達する通信装置の故障などで安全情報が伝わらない場合、機械の行動命令は実施されない（安全側故障）。従って、安全確認型では、何らかの故障が生じて、システムの安全は確保される。一方、危険側故障が生じる危険検出型では、システムの安全は必ずしも確保されない。本研究では、安全確認型の考えに則った燃焼診断手法を開発する。

水素とメタンの希薄燃焼では、火炎は不安定に成り易いことが知られている。それゆえ、水素とメタンの火炎を安全に取り扱うためには、火炎不安定挙動のメカニズムを知り、それらを安全にコントロールする必要がある。これまでに、研究代表者らは、カオス時系列解析を用いて、マルチマイクロフレームにおける火炎の不安定挙動を調べている。そして、フラットフレームと比較して、燃焼範囲が広く、火炎が安定であることを見出している。しかし、用いている燃焼診断手法が危険検出型であるので、この手法で燃焼をコントロールしても、安全確保の観点からは不十分である。

そこで本研究では、安全確認型の燃焼診断手法を開発し、それをマルチマイクロフレームに適用する。混合気の成分濃度や流速をパラメーターとして実験・数値計算を遂行し、マルチマイクロフレームの特性を診断し、それをスマートコントロールする術を構築する。そして、安全を確保した発電システムの開発の推進を検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) マルチマイクロバーナー

ステンレス製の細径円管を用いて、マルチマイクロバーナーの構築する。図1に本研究で使用しているマルチマイクロバーナーの概略図を示す。マルチマイクロバーナーは、細径円管を正三角形に3本束ねたものおよび正六角形状に7本、19本束ねたハニカム構造を有する3種類のものを採用する。3本のマルチマイクロバーナーの場合においては、穴あけ加工を施した円筒状のシールゴムに円管を突き刺し、さらに円管（真鍮製）で覆い、継手を介して上流側のフレキシブルチューブと接合することにより、マルチマイクロバーナーを構成させる。マルチマイクロバーナーの上流側で混合されたメタン（純度99.99%）と乾燥空気（O<sub>2</sub>濃度21%）の混合気がバーナー下部から流入する。

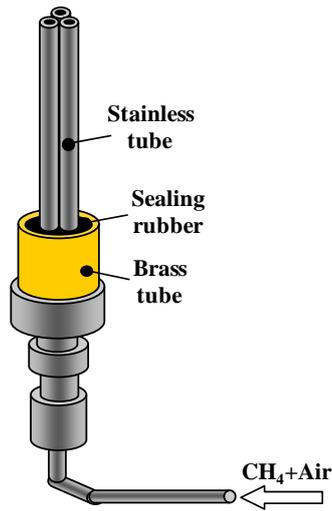


図1 マルチマイクロバーナーの概略図

(2) 火炎の発光強度の測定

図2に発光強度測定概略図を示す。火炎の発光強度の測定には、フォトダイオード:Fを用いる。測定方法は、CH発光を受光するために、フォトダイオード前方に干渉フィルター:Kを設置する。火炎からのCH発光の照度変化をフォトダイオードで電流変化として取り出し、電流-電圧変換アンプ:Aを介してデータ収集装置:DKに取り込む。ここでは、サンプリング周波数を500 [Hz]としている。得られた信号波形をコンピューターで処理し、パワースペクトル、カオス時系列解析で用いられている手法を採用して、ゆらぎをカオス力学的観点から調べる。

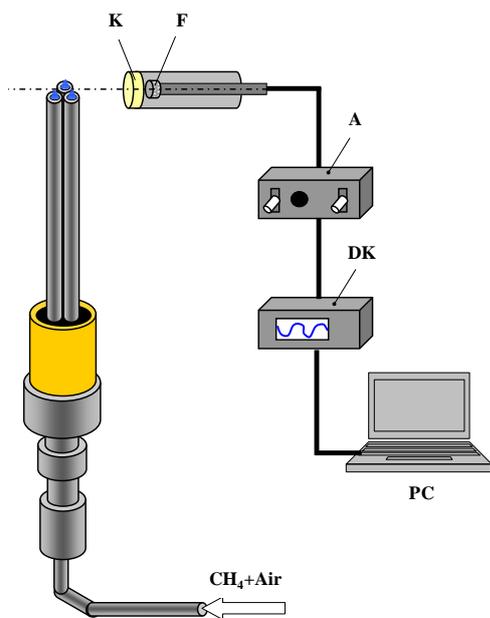


図2 発光強度測定概要図

4. 研究成果

(1) 火炎の形状

図3～図5に各マルチマイクロバーナーに形成される火炎の直接写真を示す。これらは、当量比の変化に対する火炎形状の変化を表すものである。写真は全て真横方向の視点より撮影した。

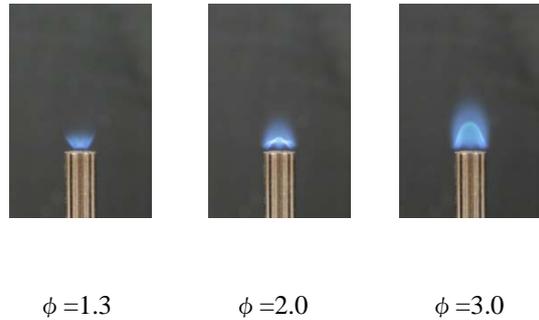


図3 マルチマイクロバーナー (n = 7) における火炎の直接写真 (Q = 0.2 [ℓ/min])

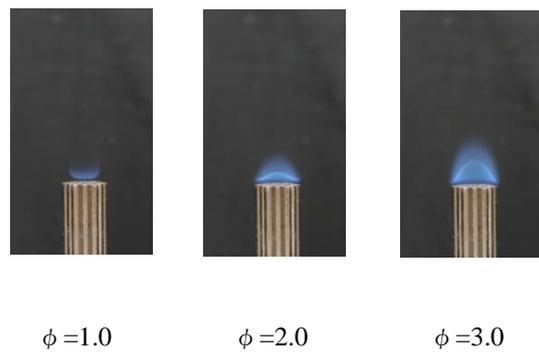


図4 マルチマイクロバーナー (n = 19) における火炎の直接写真 (Q = 0.2 [ℓ/min])

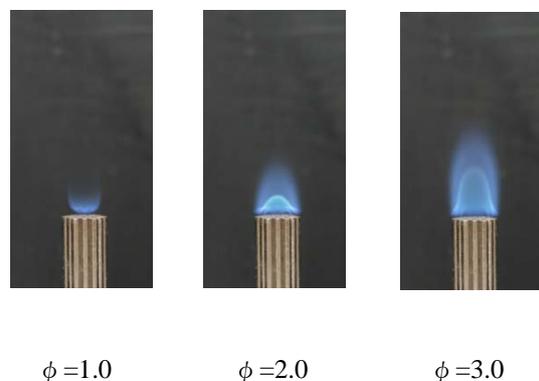


図5 マルチマイクロバーナー (n = 19) における火炎の直接写真 (Q = 0.4 [ℓ/min])

(2) 火炎からの自発光スペクトル

自発光スペクトルの測定結果を図6に示す。図の横軸は波長[nm]、縦軸は入光した出力電荷量が電荷-電圧変換回路により電圧に変換され、さらにA/Dコンバータでデジタル値に変換された値を示す。結果で見られる各ピークはOH発光(306.4[nm])、CH発光(431.5[nm])、C2発光(516.5[nm])である。

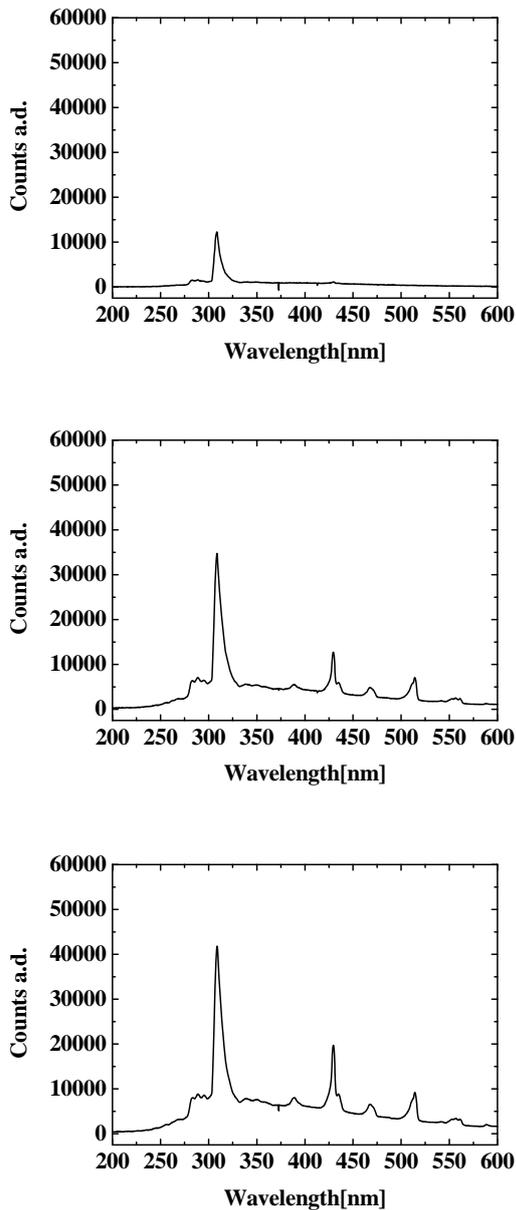


図6 マルチマイクロバーナー (n = 19) における火炎の自発光スペクトル (Q = 0.4 [ℓ/min])

(3) 火炎からの発光強度変化

各マルチマイクロバーナー、各当量比で火炎からの発光強度を測定すると、発光強度の大きさによって値が大きく異なる。そこで、発光強度の標準化を行うことで、火炎のゆらぎの大きさのみを示すことができる。その標準化には次式を用いる。

$$y(t) = \frac{x(t) - \langle x(t) \rangle}{\langle x(t) \rangle}$$

ここで、 $y(t)$ は発光強度の平均値を零にして標準化した値、 $x(t)$ は火炎のCH発光強度の測定値、 $\langle x(t) \rangle$ は測定値の平均値を示す。そして、各マルチマイクロバーナーの流量と当量比の変化による火炎のゆらぎの時間的な変化を調べる。

図7～図9に各条件における標準化した発光強度の時間変化、及びパワースペクトルと周波数の関係を示す。

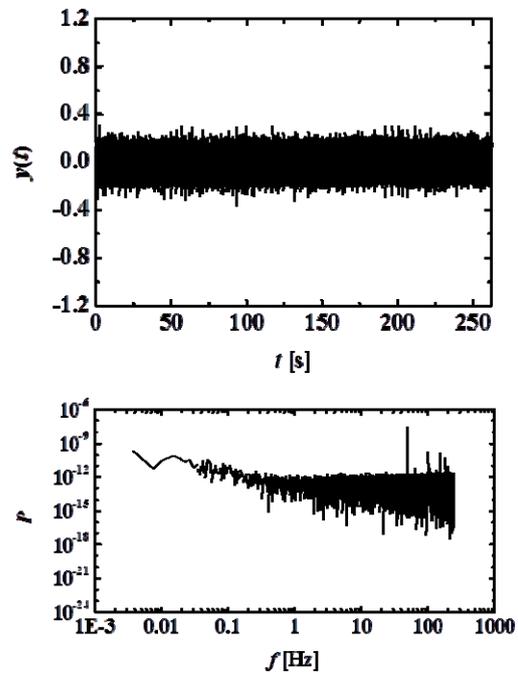
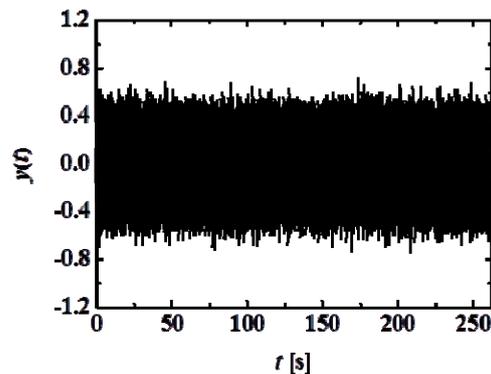


図7 標準化した発光強度の時間変化、及びパワースペクトルと周波数の関係 (n = 7, Q = 0.2 [ℓ/min], φ = 1.3)



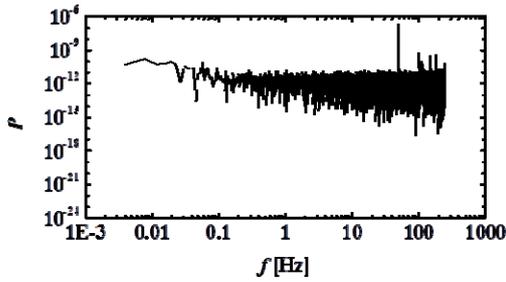


図8 標準化した発光強度の時間変化, 及びパワースペクトルと周波数の関係 ( $n = 19$ ,  $Q = 0.2$  [ℓ/min],  $\phi = 1.0$ )

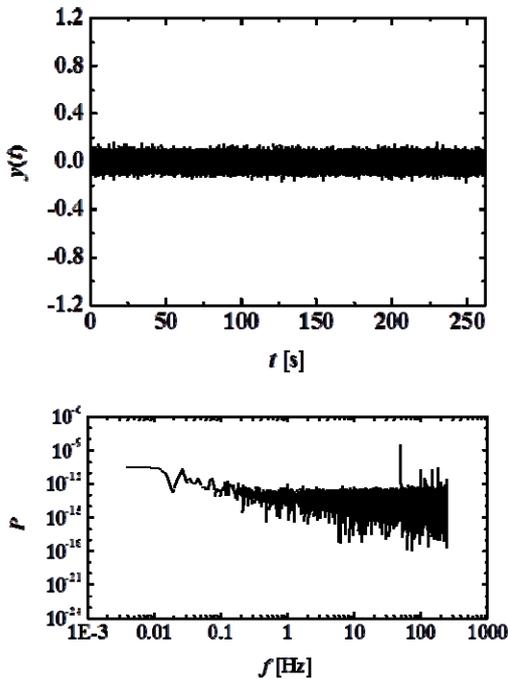


図9 標準化した発光強度の時間変化, 及びパワースペクトルと周波数の関係 ( $n = 19$ ,  $Q = 0.4$  [ℓ/min],  $\phi = 1.0$ )

#### (4) 時系列データからのアトラクターの再構築

アトラクターとは、位相空間上での点の動きを時間経過と共に吸い寄せられる軌道や点のことである。計測された時系列データは、通常 1 つの系列しか得られない場合が多い。このような場合に、Takens の埋め込み定理を用いると、1 次元時系列データから  $m$  次元空間の軌道を再構成することができる。得られた 1 次元の時系列データが次の場合、 $m$  次元状態空間に次のような点列が構成される。

$$v(t) = (y(t), y(t + \tau), \dots, y(t + (m - 1)\tau))$$

ここで、 $\tau$  は遅れ時間の大きさである。  $\tau$  は原理的には任意の大きさでよいが、あまり小さいと独立な成分が小さく図形が直線状となり、その特徴が判定しにくい。また、あまり大きくとるのも無意味である。さらに、カオス特有の軌道不安定性のために雑音が拡大されて、不必要な誤差を多く取り入れてしまう。通常、平均周期の数分の 1 をとる。また、埋め込み次元  $m$  の値であるが、不規則波形の場合には、 $m$  は少なくとも 3 以上である必要がある。

本研究では、遅れ時間  $\tau$  は、パワースペクトルのピーク周波数から求めた時間の 1/4 の時間を用いるものとする。埋め込み次元は、 $m = 3$  とし、3 次元再構成空間

$$v(t) = (y(t), y(t + \tau), y(t + 2\tau))$$

でアトラクターを再構成する

図 10 と図 11 に各条件におけるパワースペクトルと周波数の関係、並びにアトラクターを示す。

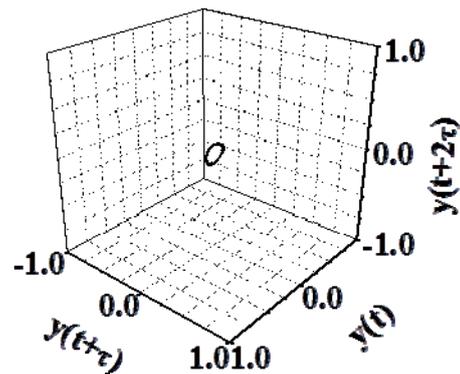
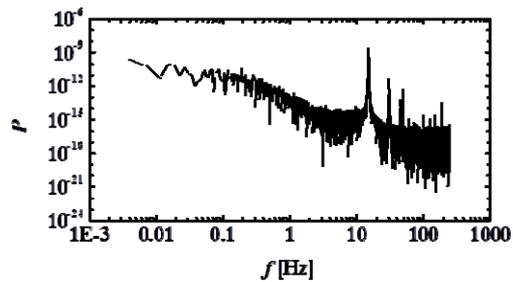


図 10 パワースペクトルと周波数の関係, 並びにアトラクター ( $n = 7$ ,  $Q = 0.4$  [ℓ/min],  $\phi = 20.0$ )

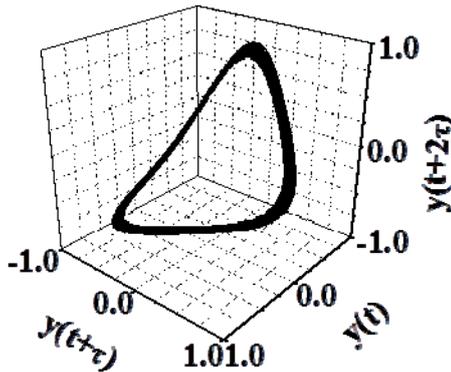
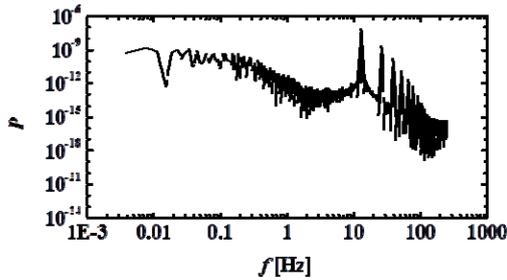


図 1 1 パワースペクトルと周波数の関係，並びにアトラクター ( $n=19$ ,  $Q=0.4$  [ $\ell/\text{min}$ ],  $\phi=20.0$ )

各バーナーにおける RMS と当量比の関係を示したのが図 1 2 である。

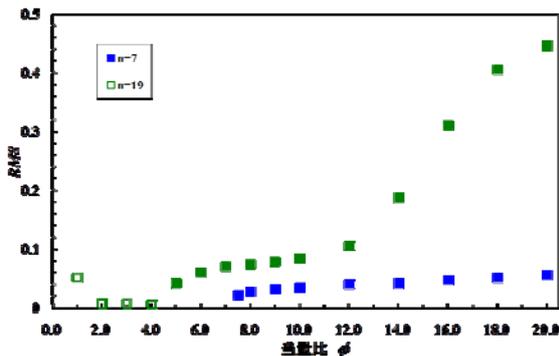


図 1 2 マルチマイクロバーナーにおける RMS と当量比の関係 ( $Q = 0.4$  [ $\ell/\text{min}$ ])

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① S. Kadowaki and H. Funayama, Characteristics of three-dimensional cellular premixed flames induced by intrinsic instability, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization, 査読有, ID #97, 2008, 9 pages.
- ② A. Kaewpradap and S. Kadowaki, Intrinsic instability of premixed flames at sufficiently low activation energy, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 8, 2010, pp. 15-21.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 丸山, 門脇, マルチバーナー上に形成されるメタン・空気予混合火炎の挙動とゆらぎ, 第 46 回日本伝熱シンポジウム, 2009 年 6 月 2 日, 京都市.
- ② 丸山, 國吉, 門脇, マルチマイクロバーナー上に形成されるメタン火炎の挙動とゆらぎ, 日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会, 2010 年 3 月 10 日, 新潟市.
- ③ 國吉, 門脇, フラットバーナー上に形成されるセル状火炎: CH-PLIF による計測, 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会, 2011 年 3 月 5 日, 長野県上田市.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kadowaki/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

門脇 敏 (KADOWAKI SATOSHI)

長岡技術科学大学・大学院技術経営研究科・教授

研究者番号: 20185888