

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06181

研究課題名(和文) 乱れの時空間的変動スケールに着目した拡散火炎の燃焼特性解明に関する基盤研究

研究課題名(英文) Fundamental study on combustion characteristics of diffusion flame focusing on spatial-temporal fluctuation scale of turbulence.

研究代表者

末永 陽介 (Suenaga, Yosuke)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：60413720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：乱流拡散火炎の局所構造をモデル化した伸長円筒状拡散火炎を研究対象とした。酸化剤流速を正弦波振動させることで、流れの非定常性をモデル化した。エンジンの排気再循環技術の高度化に貢献するため、排気ガスに含まれるCO<sub>2</sub>とN<sub>2</sub>を燃料と酸化剤の希釈剤とした。次のことが明らかとなった。酸化剤流速の変動周波数の増加とともに、燃料流の速度勾配の変動振幅が増加し、火炎に流入する燃料の質量流束の変動振幅が増加する。そのため、燃焼反応と関係のある火炎輝度の変動振幅もまた、周波数の増加とともに大きくなる。CO<sub>2</sub>で希釈された火炎は、N<sub>2</sub>で希釈された火炎よりも火炎曲率の効果が顕著に現れ、火炎輝度の変動振幅がより大きくなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の燃料流と酸化剤流の速度を同位相で正弦波的に変動させたときの火炎の応答特性に関する研究では、速度の変動周波数が増加するにつれて、反応速度、火炎温度、発熱速度の変動振幅は単調に減少することが示されている。しかし、本研究のように酸化剤流の速度のみを正弦波的に変化させた場合、周波数の増加に対して、火炎輝度(反応の活発さ、反応速度)の変動振幅が、速度の変化域における定常火炎のそれよりも大きくなるという興味深い燃焼現象が見られ、考察することができた。さらに、火炎曲率の影響が希釈剤の種類によって異なることも示すことができたことは、学術的意義があり、エンジンを含む燃焼機器の開発においても意義がある。

研究成果の概要(英文)：A stretched cylindrical diffusion flame was used in which the local structure of the turbulent diffusion flame was modeled. The flow unsteadiness was modeled by sinusoidal oscillation of the oxidizer flow velocity. In order to contribute to the advancement of exhaust gas recirculation technology of diesel engine, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> contained in exhaust gas were used as diluents for fuel and oxidizer. The following results were obtained. As the fluctuation frequency of the oxidizer flow rate increases, the fluctuation amplitude of the velocity gradient of the fuel stream increases, and the fluctuation amplitude of the mass flux of the fuel flowing into the flame increases. The fluctuation amplitude of the flame luminosity, which is related to the combustion reaction, also increases as the frequency increases. The flame curvature effect of the flame diluted with CO<sub>2</sub> appears more remarkably than the flame diluted with N<sub>2</sub>, and the fluctuation amplitude of flame luminosity appears larger.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 拡散火炎

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱流制御がエンジン燃焼技術の高度化のカギとなる。乱流拡散火炎の局所構造は、大小様々な渦によって、歪み・湾曲しており、非定常的に変化する。この基礎研究の多くは、速度歪み(伸長)の影響のみが作用する対向流平面火炎を対象としている。乱れの制御による燃焼器の低燃費化・排気浄化技術の進化には、乱流火炎の特徴である伸長に加え、曲率(湾曲)と流れの非定常性に着目する必要がある。本研究では、伸長と曲率の影響を同時に受ける火炎のモデルである、伸長円筒状拡散火炎を研究対象とし、流れの非定常性を酸化剤流速の正弦波振動でモデル化することによって、流れの正弦波振動に対する円筒状拡散火炎の応答特性を解明することにした。さらに、エンジンの排気浄化技術の一つである、排気再循環技術(EGR: Exhaust Gas Recirculation)に着目し、排気ガスの主成分である二酸化炭素や窒素による流れ場の希釈の影響が火炎の応答特性に及ぼす影響を解明することに着想している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、流れの非定常変化に対する流れ場の速度歪(伸長)と変形(曲率)の影響を受ける拡散火炎の応答特性を解明することにある。そのため、乱流火炎の局所構造のモデル火炎である、軸方向に伸長する円筒状の拡散火炎を対象とする。乱れによる速度歪と変形のスケールは、火炎に作用する伸長度(率)とその直径を任意に変化させることでモデル化する。また、乱れの変動時間スケールは、流れに加える正弦波振動の周波数により制御する。この研究により、乱流によって火炎に作用する伸長と曲率の動的効果が明確になり、乱れの制御による低燃費化・排気浄化技術の深化に貢献できる知見が得られる。さらに、EGR 技術は現在でも排気浄化を目的に利用されており、この技術の高度化に貢献するため、排気ガスの主成分である二酸化炭素と窒素を燃料流と酸化剤流の希釈剤としたときの火炎の応答特性を解明する。

3. 研究の方法

図1は円筒状拡散火炎バーナの概略である。酸化剤は、火炎より外側から中心軸に向かって供給され、燃料は火炎内側より半径方向外側に供給される。軸方向に伸長する円筒状拡散火炎は酸化剤側に形成される。スピーカーにより酸化剤流速を正弦波的に振動させて、火炎に周期的な速度の歪(伸長)を与え、乱流燃焼場の火炎を模擬する。酸化剤供給口において正弦波振動する酸化剤流速  $v_o$  は次式で定義される。

$$v_o = v_{om} + A \sin(2\pi ft)$$

ここで、 $v_{om}$  は酸化剤供給口における酸化剤の平均流速である。A はその速度の変動振幅であり、10 cm/s 一定とした。f は変動周波数である。時間変化する  $v_o$  は Particle Image Velocimetry (PIV) を用いて計測した。実験条件は表1に示される。表中の  $v_f$  は、燃料ノズル出口における吹出し速度、 $\zeta_f$  と  $\zeta_o$  は、それぞれ燃料流と酸化剤流中に含まれる希釈剤(CO<sub>2</sub>およびN<sub>2</sub>)の体積%、 $Z_{st}$  は理論混合分率である。 $Z_{st} < 0.5$  のとき、火炎は酸化剤流中に、 $Z_{st} > 0.5$  のとき、火炎は燃料流中に形成されることになる。 $T_{fad}$  は断熱火炎温度である。一般に、燃焼には酸化剤として空気が用いられるので、実験条件の一つに、空気中の79%を占めるN<sub>2</sub>が希釈剤として選ばれた。N<sub>2</sub>で燃料流と酸化剤流を希釈して形成された火炎(以降、N<sub>2</sub>希釈火炎と呼ぶ)の燃焼特性を調査した。続いて、燃焼ガス中に多く含まれる成分であるCO<sub>2</sub>を希釈剤とした火炎(以降、CO<sub>2</sub>希釈火炎と呼ぶ)の燃焼特性を調査した。CO<sub>2</sub>希釈火炎を対象とした実験で得られる知見を議論するにあたり、N<sub>2</sub>希釈火炎の結果を用いることを考えた。比較にあたり、断熱火炎温度がほぼ同じとなるようにCO<sub>2</sub>希釈火炎の  $\zeta_f$  と  $\zeta_o$  を選ぶ必要があると考え、 $\zeta_f$  は40%と50%を、 $\zeta_o$  は65%一定とした。

本研究では、燃焼反応の活発さを表す一つの指標として火炎輝度を測定した。これは、反応が活発であるほど、ラジカルが多く形成され、火炎輝度が高くなるためである。火炎輝度(燃焼反応)には、流れの速度勾配と火炎曲率がそれぞれ影響する。本研究では、燃料と酸化剤を別々に供給するため、それぞれの流れの速度勾配、 $g_f$  と  $g_o$  を評価した。火炎曲率の影響は、反応時間と比例関係にある火炎帯厚さ  $\delta$  と火炎半径  $r_f$  との比(=  $\delta/r_f$ )が増加するほど顕著に現れる(Pitz et al., 2014)。そこで、火炎の画像を取得し、画像解析から  $\delta$  と  $r_f$  を求めた。

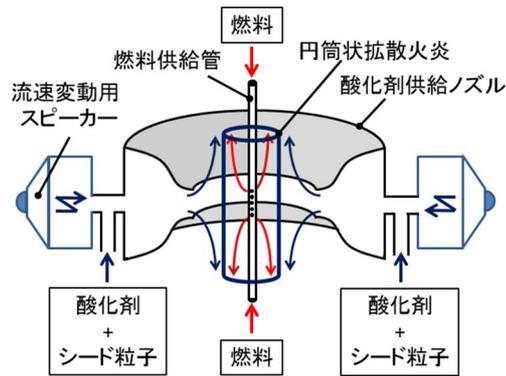


図1. 円筒状拡散火炎バーナ概略

表 1. 実験条件

Fuel/Oxidizer	f [Hz]	$v_f$ [cm/s]	$v_{o,m}$ [cm/s]	$\zeta_f$ [%]	$\zeta_o$ [%]	$Z_{st}$ [-]	$T_{fad}$ [K]
CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>				40	65	0.166	2199
CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>	10 ~ 250	40	40	50	65	0.209	2150
CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> (Air)				50	79	0.138	2122

#### 4. 研究成果

##### (1) 火炎輝度の周波数特性

図2は、CO<sub>2</sub>希釈火炎とN<sub>2</sub>希釈火炎の火炎輝度の変動振幅比  $L$  を周波数  $f$  に対して示している。ここで、 $L$  は、速度変動が与えられた火炎（以降、動的火炎と呼ぶ）の輝度の変動振幅  $L_{fd}$  を同じ速度の変化域における定常火炎（以降、静的火炎と呼ぶ）の輝度の変化幅  $L_{fs}$  の比 ( $L = L_{fd}/L_{fs}$ ) である。この図において最も興味深い点は、希釈剤の種類によらず、 $L$  は1よりも大きく、 $f$  の増加とともに増加し、50Hzで極大値をとり、その後減少する点である。しかし  $L$  の大きさは、10Hz から 150Hz の範囲において、CO<sub>2</sub> 希釈火炎の方が N<sub>2</sub> 希釈火炎よりも大きくなっている。この動的火炎の輝度の変動振幅が  $f$  の増加とともに拡大するには、速度勾配と火炎曲率が関係すると考えられるため、これらの応答特性を調査した。

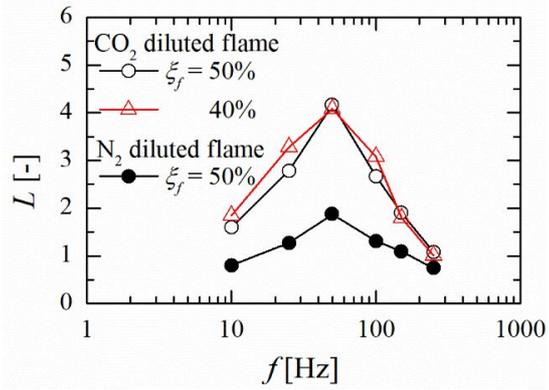


図2 火炎輝度の変動振幅比  $L$  の周波数特性

##### (2) 速度勾配が火炎輝度に及ぼす影響

図3(a)と(b)は、それぞれ酸化剤流中の速度勾配  $g_o$  と燃料流中の速度勾配  $g_f$  の時間変化を示している。横軸は無次元時間であり、 $t$  と  $T$  はそれぞれ、実時間と周期である。希釈剤には N<sub>2</sub> が用いられている。この図より、酸化剤流速のみ変化させた場合、 $g_o$  の変動振幅は、 $f$  によらずほぼ一定であるのに対し、 $g_f$  の変動振幅は  $f$  の増加に対して、大きくなることわかる。 $g_o$  と  $g_f$  がそれぞれ極大値および極小値をとる時刻は、ほぼ同時刻であることもわかる。前節で示した、 $L$  が1よりも大きくなる  $f$  では、動的火炎の輝度  $L_f$  が、 $g_o$  および  $g_f$  が極大となる時刻近傍で、最大となり、 $g_o$  および  $g_f$  が極小となる時刻近傍で最小となっていた。CO<sub>2</sub> 希釈火炎の結果もこの N<sub>2</sub> 希釈火炎の結果と類似していることが観察された。

著者は、本研究と同じ実験条件における N<sub>2</sub> で希釈された定常円筒状拡散火炎を調査し、次のことを解明した (Suenaga et al., 2016)。(1) 伸長率（速度勾配）が一定のとき、火炎曲率の増加とともに火炎温度は低下する（火炎が弱くなる）。(2) 火炎半径が一定のとき、伸長率の増加とともに火炎温度は高くなる（火炎が強くなる）。ここで、火炎温度の低下とともに、燃焼反応は弱くなり、火炎輝度は低くなる。一方、火炎温度の上昇とともに、燃焼反応は活発となり、火炎輝度が高くなると考えられる。これを踏まえ、本研究で得られた火炎伸長を表す  $g_o$  ( $Z_{st} < 0.5$  であるため、火炎は酸化剤流中に形成されており、酸化剤流の速度勾配  $g_o$  は火炎に伸長効果として作用) と、火炎曲率の影響を表す火炎帯厚さ  $\delta$  と火炎半径  $r_f$  との比 ( $= \delta/r_f$ ) が火炎輝度に及ぼす影響を考えると、 $\delta/r_f$  が増加すると火炎曲率の影響が強くなり、火炎温度が低下し、火炎輝度が低下する。一方、 $g_o$  が増加すると、火炎温度は上昇し、火炎輝度は高くなると考えられる。このような静的火炎の特性をもとに、動的火炎の輝度の結果を考察する。

$g_o$  の変動振幅は  $f$  によらずほぼ一定であり、その大きさは同じ速度の変化域における静的火炎の  $g_o$  の変化幅と同じであることから、 $g_o$  の変動が火炎輝度に及ぼす影響は、静的火炎の変化と同様に作用すると考えられる。一方、燃料流の速度勾配  $g_f$  の変動幅は  $f$  の増加とともに増加しており、火炎より燃料流側の燃料の濃度勾配が静的火炎よりも大きく変化し、火炎より燃料流側の拡散層厚さも大きく変化すると考えられる。ここで、 $g_f$  と  $g_o$  はほぼ同位相で変化していることから、 $g_f$  と  $g_o$  が最大となる時刻では、拡散層は薄くなり、よどみ面から拡散によって輸送される燃料の火炎への流入質量流束が静的火炎の場合より増加すると考えられる。一方、 $g_f$  と  $g_o$  が最小となる時刻において、拡散層は厚くなり、燃料の火炎への流入質量流束が静的火炎の場合よりも小さくなると推察される。以上、火炎に流入する燃料の質量流束の変動幅の増大が、希釈剤の種類によらず 50 Hz で最大となったため、 $L$  もまた最大になったと考えられる。

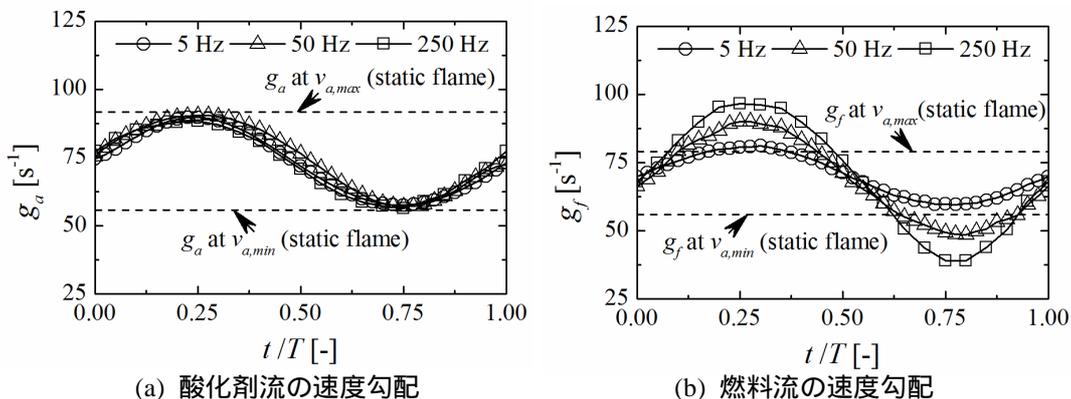


図3 N<sub>2</sub> 希釈火炎における酸化剤流と燃料流の速度勾配の時間変化。

$g_f$ の変動振幅が、 $f$ の増加に対して大きくなる一方、 $f$ が50Hzよりも大きくなると、 $L$ が小さくなるのは、 $f$ が大きくなるにつれて、酸化剤流および燃料流中の拡散層内における反応物の質量流束の変動振幅が、物質の拡散現象によって減衰するためである。そのため、 $f$ が50Hzよりも大きくなると、 $L$ もまた減少したと考えられる (Egolfopoulos and Campbell, 1996)。

### (3) 火炎曲率が火炎輝度に及ぼす影響

図4は、燃料流の希釈率  $\xi_f$  が50%におけるCO<sub>2</sub>希釈火炎とN<sub>2</sub>希釈火炎の火炎輝度  $L_f$ 、酸化剤流の速度勾配  $g_o$ 、火炎帯厚さと火炎半径の比  $\delta/r_f$  の時間変化を示している。火炎曲率の影響を表す  $\delta/r_f$  が火炎輝度に及ぼす影響は、前述のように、CO<sub>2</sub>希釈火炎もN<sub>2</sub>希釈火炎と、ほぼ同じレイヌ数であることから、 $\delta/r_f$ が増加すると火炎曲率の影響が強くなり、火炎温度が低下し、火炎輝度が低下すると考えられる。これらの図より、 $L_f$ が極大となる時刻で、 $\delta/r_f$ はほぼ最小となり、 $L_f$ が極小となる時刻では、 $\delta/r_f$ は最大となっている。以上のことから、火炎曲率の影響もまた、火炎輝度の変動振幅を大きくさせていると推察できる。ここで、図2において、CO<sub>2</sub>希釈火炎の火炎輝度の変動振幅比  $L$  が、N<sub>2</sub>希釈火炎よりも大きいことが示された。この原因は、 $\delta/r_f$ の違いが関係していると考えられる。すなわち、CO<sub>2</sub>希釈火炎の  $\delta/r_f$  の変動振幅はN<sub>2</sub>希釈火炎のそれよりも大きく、火炎曲率の変動の影響がCO<sub>2</sub>希釈火炎に強く現れたと考えられる。 $\delta/r_f$ の変動振幅の大きさの違いは、低い周波数ほど大きいため、低周波数である10Hzから、CO<sub>2</sub>希釈火炎の  $L$  は、N<sub>2</sub>希釈火炎よりも大きく現れたと考えられる。

### (4) まとめ

酸化剤流速の正弦波振動に対する伸長円筒状拡散火炎の輝度の応答特性を実験的に調査した。調査にあたり、自動車用エンジンの排気再循環技術(EGR技術)の高度化も視野に入れ、排気ガス中に多く含まれるN<sub>2</sub>に加え、CO<sub>2</sub>を燃料と酸化剤の希釈剤とした。得られた知見を要約する。

速度変動振幅を一定としたとき、周波数によらず、酸化剤流の速度勾配の変動振幅は一定であり、同じ速度の変化域における静的火炎の速度勾配の変化幅と同じである。しかし、燃料流の速度勾配の変動振幅は、周波数の増加とともに増加する。

火炎輝度の変動振幅は、周波数の増加とともに大きくなり、50Hzで極大となり、その後減少する。この火炎輝度の変動振幅は、同じ速度の変化域における静的火炎の輝度の変化幅よりも大きくなり、火炎は非定常的に応答する。

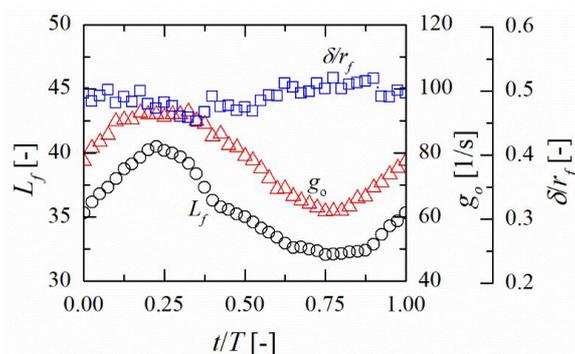
周波数の増加に伴う火炎輝度の変動振幅の増加は、燃料流の速度勾配の変動振幅が周波数の増加とともに大きくなり、火炎より燃料流側の濃度勾配もまた静的火炎に比べて大きく変動することから、火炎への燃料の流入質量流束の変動振幅が増加することによって引き起こされる。

動的火炎の火炎輝度の変動振幅の増加は、火炎曲率の影響も関係する。CO<sub>2</sub>希釈火炎の輝度の変動振幅が、N<sub>2</sub>希釈火炎のそれよりも大きくなるのは、火炎曲率の影響がCO<sub>2</sub>希釈火炎において顕著に現れるためである。

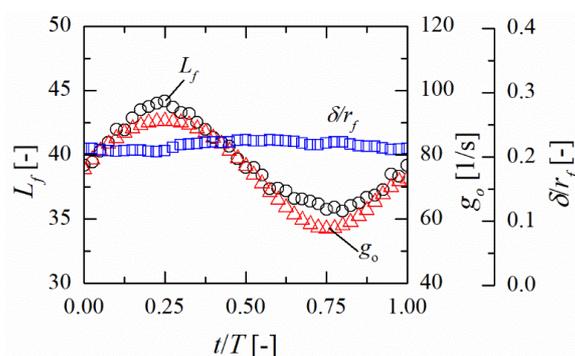
### 参考文献

- Egolfopoulos, F. N. and Campbell, C. S., Unsteady counterflowing strained diffusion flames: diffusion-limited frequency response, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.318 (1996), pp.1–29.
- Pitz, R. W., Hu, S. and Wang, P., Tubular premixed and diffusion flames: effect of stretch and curvature, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.42 (2014), pp.1–34.
- Suenaga, Y., Yanaoka, H., Momotori, D., Influences of stretch and curvature on the temperature of stretched cylindrical diffusion flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.11, No.2, (10 pages), 2016, DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0028.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。



(a) CO<sub>2</sub>希釈火炎( $\xi_f = 50\%$ ,  $f = 50\text{Hz}$ )



(b) N<sub>2</sub>希釈火炎( $\xi_f = 50\%$ ,  $f = 50\text{Hz}$ )

図4 火炎輝度  $L_f$ 、酸化剤流の速度勾配  $g_o$ 、火炎帯厚さと火炎半径の比  $\delta/r_f$  の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yosuke Suenaga, Hideki Yanaoka, Mamoru Kikuchi, Shun Sasaki	4. 巻 7
2. 論文標題 Response of Stretched Cylindrical Diffusion Flame to Sinusoidal Oscillation of Air Flow Velocity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics Engineering and Automation	6. 最初と最後の頁 321-326
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi: 10.17265/2159-5275/2017.06.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 末永陽介, 柳岡英樹, 菊池護, 佐々木駿	4. 巻 84
2. 論文標題 空気流速の周期変動に対する伸長円筒状拡散火炎の応答特性（速度変動振幅が火炎応答に及ぼす影響）	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1299/transjsme.17-00444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yosuke Suenaga, Hideki Yanaoka, Mamoru Kikuchi, Shun Sasaki
2. 発表標題 Response of Stretched Cylindrical Diffusion Flame to Sinusoidal Oscillation of Air Flow Velocity
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference（国際学会）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----