

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14244

研究課題名(和文) ロケット燃焼計測における高エネルギーバンド励起レーザー誘起蛍光法の分光学的開発

研究課題名(英文) Spectroscopic development of laser-induced fluorescence method using higher energy band excitation for rocket combustion diagnostics

研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI, Hideaki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30170343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：ロケット燃焼に対するOH-平面レーザー誘起蛍光計測を実現するため、高エネルギーOH(2,0)バンド励起計測手法を開発した。本励起手法を利用することで、高強度なOH(0,0)バンド自発光の干渉を排除しOH(2,1)バンド蛍光を取得可能であり、世界的にも希少な最高5.9 MPaにおけるH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>噴流拡散火炎の2次元瞬時OH分布取得に成功した。さらに計測定量化を目的とし、高圧高温燃焼条件に対応する計測較正用バーナの開発を行った。最高0.49 MPaにおいて火炎温度が2900 K程度に達するCH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>層流火炎の安定化に成功し、計測較正バーナの設計要件を満たすことが示された。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve OH-Planar Laser-Induced Fluorescence (OH-PLIF) measurements to rocket combustion which emits intense chemiluminescence, OH(2,0) band excited OH-PLIF method was developed in this study. The OH(2,1) band fluorescence was detected effectively by eliminating the interference of intense OH(0,0) band chemiluminescence, and the images of two-dimensional instantaneous OH distribution in H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> jet diffusion flames were successfully acquired up to 5.9 MPa. Moreover, a calibration burner capable of adapting to high pressure and temperature flame conditions was designed to establish the quantitative optical measurement methods for rocket combustion. The oxygen-enriched CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> laminar quasi one-dimensional flames were stabilized on the burner up to 0.49 MPa, with maximum flame temperature simulated to be higher than 2900 K. From these results, the primal requirements of the calibration burner were sufficiently archived.

研究分野：工学

キーワード：ロケット燃焼 高圧燃焼 高エネルギー励起 レーザー計測 OH-PLIF

1. 研究開始当初の背景

一般的な2液推進剤系ロケットエンジンでは、液体水素(LH2)および液体酸素(LOX)が用いられる。ロケット燃焼は10 MPaを越える超高压 H2/O2 極限環境燃焼であり、多様な数値解析結果を評価できる実験情報の取得は極めて困難である。高压高温火炎の診断には、非接触かつ高分解能という利点を有するレーザー分光計測が適している。2次元瞬時火炎断面構造を診断可能な OH 平面レーザー誘起蛍光(OH-PLIF)計測は、燃焼計測研究において広く利用されており、ロケット燃焼の計測手法としても有望である。しかし、高压高温ロケット燃焼を計測対象とする場合には、その計測原理に基づく圧力および温度依存性による信号強度の低下、および極めて強烈な火炎自発光の干渉による S/N(Signal to Noise)比の低下が避けられず、低压環境で培われた従来の計測手法では、計測そのものが困難であった。

2. 研究の目的

本研究は、世界的にも例のない最高 7.0 MPa までの高压環境下における H2/O2 噴流拡散火炎に対する OH-PLIF 計測の実現に挑戦するため、燃焼学のみならず分光学を基礎とする計測原理に立ち返り、強烈な自発光干渉と蛍光信号を分離する最適な高エネルギーバンド電子励起・受光手法条件を新たに構築する。高压容器および供試せん断型噴射器を用いて上述した燃焼場を再現し、本手法を適用することで圧力依存性を始めとする複雑な分光学的特性を評価する。さらに計測手法定量化の第一段階として、ロケット燃焼のような高熱負荷条件に対応する光学計測校正バーナーを設計し、最高 0.5 MPa までのバーナーおよび火炎特性を評価する。これらによって、ロケット燃焼を代表とする極限環境燃焼の分光計測学の発展と学理構築を図る。

3. 研究の方法

0.5 MPa 以下の H2/O2 噴流拡散燃焼試験に基づく計測手法の構築および最適化は東北大学流体科学研究所の高压燃焼試験設備を、0.5 MPa 以上の H2/O2 噴流拡散燃焼試験は JAXA 角田宇宙センターの可視化高压燃焼装置を利用して実施した。酸化剤 O2 と燃料 H2 の質量流量比 O/F は 8 を目標に流量を設定した。OH-PLIF 計測には、OH の励起光源として Nd:YAG レーザーおよび波長可変色素レーザーを利用し、シート光学系を用いてレーザービームをシート状に形成し、2次元の OH 分布を取得した。レーザービーム強度は全ての試験で 15 ~ 17 mJ とした。蛍光検出には ICCD カメラを利用した。光学干渉フィルターについては後述する。

本研究で開発した高压高温燃焼に対応する光学計測校正バーナーの概略図を図1に示す。本バーナーはノズル部と供給部の2つの部品のみで構成され、ノズル部の材質は熱伝

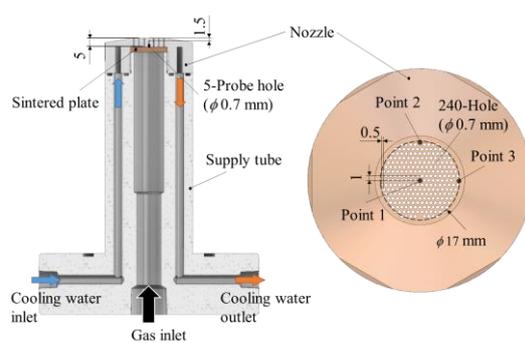


図1 計測校正バーナー概略図

導率の高い無酸素銅を利用し、さらに水冷方式を採用している。ノズルには直径 0.7mm の噴射穴が 240 個千鳥格子状に設けられている。本バーナーの燃焼試験はすべて、前述の流体科学研究所高压燃焼試験設備を利用した。混合気条件は、メタン (CH4) /酸素 (O2) /窒素 (N2) 酸素富化火炎とした。酸化剤の酸素富化率 $\beta$ は各ガスの体積流量 Q を用いて、 $\beta = Q_{O2}/(Q_{N2}+Q_{O2})$  と定義した。

4. 研究成果

(1)高エネルギーバンド励起 PLIF 計測手法

蛍光は吸収発光の一種であり、吸収と放射の2つの過程が存在する。吸収過程として一般的には、基底振動準位 $v'=0$ から励起振動準位 $v'=1$ に励起する OH(1,0)バンド励起手法が採られるが、その後放射する蛍光は OH(0,0)および OH(1,1)バンドにピークを有し、これは高強度 OH(0,0)バンド自発光とほぼ同波長の 310 nm 付近であり、両者を分離することが困難となる。本研究では、さらに高い励起振動準位 $v'=2$ に励起する OH(2,0)バンド励起を選定した。回転線の選定として、高压 H2/O2 噴流拡散火炎計測では、高信号強度を得ることを第一の目的とし、吸収強度の強い Q1(6)ブランチ(262.455 nm)を選定した。計測校正バーナーに形成される火炎計測においては、2500 ~ 3000 K において温度依存性の小さい Q1(9)ブランチ(263.586 nm)を選定した。

図2に、大気圧下において取得した OH(1,0)バンドおよび OH(2,0)バンド励起における蛍光スペクトルの比較を示す。OH(2,0)バンド励起では検出対象の OH(2,1)バンド蛍光は高強

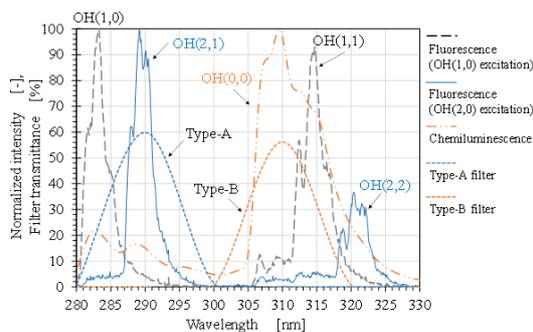


図2 蛍光および自発光スペクトルの比較

度の OH(0,0)バンド自発光に対して 20 nm 以上の波長差を有し、光学干渉フィルターによる蛍光と高強度自発光の分離が十分に可能となることが示された。本研究では、UG11(SCHOTT)および LX0290(朝日分光)フィルターの組合せを利用し、OH(2,1)バンド蛍光を検出した。ここで、当フィルターの組合せの有効中心波長および半値幅はそれぞれ、290 nm および 10 nm であり、これを Type-A フィルターと呼称する。また、Type-B と呼称する UG11(SCHOTT)および LX0310(朝日分光)フィルターの組合せを利用し、OH(0,0)バンド自発光強度およびその干渉の度合いを評価した。Type-B フィルターの有効中心波長および半値幅はそれぞれ、310 nm および 10 nm である。

### (2)高圧 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 火炎に対する OH-PLIF 計測

雰囲気圧力 P<sub>C</sub>=0.65~2.00 MPa において取得した非積算瞬時 OH-PLIF 画像を図3に示す。図中に示されるとおり、本圧力条件では極めて良好な S/N 比を有し、軸方向距離 Z=0~12 mm の範囲における H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> せん断拡散火炎の2次元 OH 分布を観察することが可能である。計測画像の空間分解能は 100 μm/pixel 以下であり、高圧下における薄い火炎帯の形状とその非定常な変化を明瞭に示している。信号強度値の圧力変化に注目すると、その強度は圧力の上昇に従って低下していることがわかる。これは圧力上昇に従ったクエンチグレート（無放射減衰速度）の上昇および励起線のブロードニングによる影響を示し、一般的な OH(1,0)バンド励起手法と同様であることがわかった。しかし、圧力上昇に従った蛍光強度の低下率は高圧下ほど小さく、これはクエ

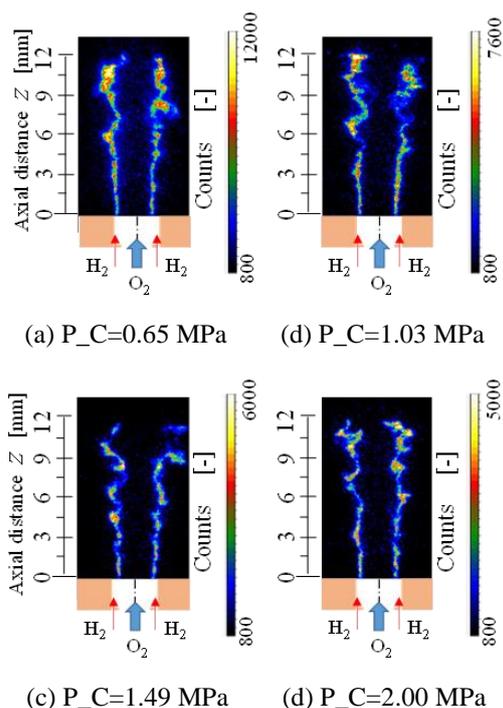


図3 瞬時 OH-PLIF 画像

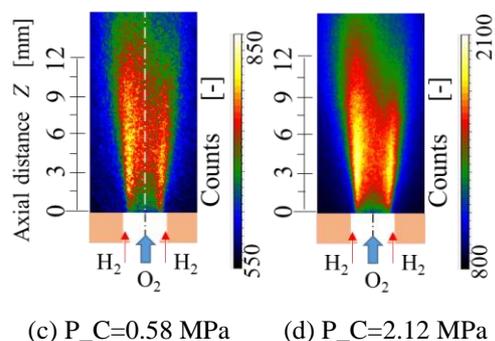


図4 瞬時自発光干渉画像

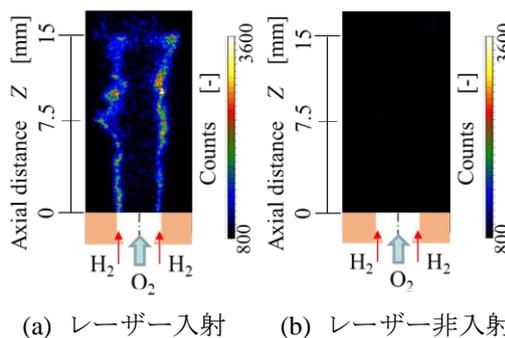


図5 瞬時 OH-PLIF 画像 (P<sub>C</sub>=5.91 MPa)

ンチングレートが分母に存在する蛍光収率の圧力依存性と同様である。本圧力条件および信号強度値のダイナミックレンジ内では、自発光の干渉を受けないことが確認された。

自発光の干渉の強さを評価するために、OH(0,0)バンド自発光を透過する Type-B フィルターを利用した場合の自発光（背景光）画像を取得した。その結果を図4に示す。使用した受光器およびその増幅率設定等は全て図3に示される PLIF 計測条件と同一である。図中に示されるとおり、図3に示される PLIF 画像よりも強い自発光の干渉を受け、圧力および火炎温度の上昇に従ってその強度は上昇し、ロケット燃焼特有の高強度火炎自発光場における計測の困難さを示すものとなり、より高圧下ではさらに自発光強度が上昇することは明らかである。

これらの結果から、OH(2,0)バンド励起手法では自発光の干渉を効果的に防ぎ、十分な蛍光強度を得られることが確認されたため、より高い圧力条件での計測に適用した。本研究における最高雰囲気圧力 P<sub>C</sub>=5.91 MPa において取得された非積算瞬時 OH-PLIF 画像および非レーザー入射時の瞬時背景光画像を図5に示す。図中に示されるとおり、図3に示される S/N 比には劣るが、非積算単発撮影であっても OH 分布を観察するには十分な S/N 比を有している。さらに、非レーザー入射時の背景光画像を観察しても、自発光の干渉は見受けられない。5.9 MPa における OH-PLIF 燃焼計測の例は世界的にも極めて希少な例である。従来は圧力上昇に対する蛍光強度の低下および自発光強度上昇による

S/N 比の急激な低下が起因し、ロケット燃焼に対する OH-PLIF 計測が困難であった。しかし本研究において開発した OH(2,0)バンド励起手法を用いることで、自発光干渉による S/N 比の低下は十分に低減可能であり、世界未踏の 7.0 MPa 以上のロケット燃焼に対する OH-PLIF 計測技術として有望であることが示された。

### (3)計測較正バーナーの作動結果

大気圧下においてバーナーノズル上に形成された当量比 $\phi=1.00$ における CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>酸素富化火炎の積算 OH-PLIF 画像を図 6 に示す。大気圧条件においては、酸素富化率 $\beta = 1.00$ 、つまり純酸素燃焼条件であっても定常火炎の安定化が可能であった。火炎後流の OH 分布は、軸方向および半径方向に対してほぼ一様に観察され、フラットフレームバーナーで形成される準一次元火炎と同様とみなせる。高酸素富化率条件では、レーザー通過方向に対する蛍光強度の減衰が観察されるが、これは酸素富化火炎特有の高 OH 濃度によるレーザーエネルギー吸収による影響である。軸方向に対する強度の変化はレーザ

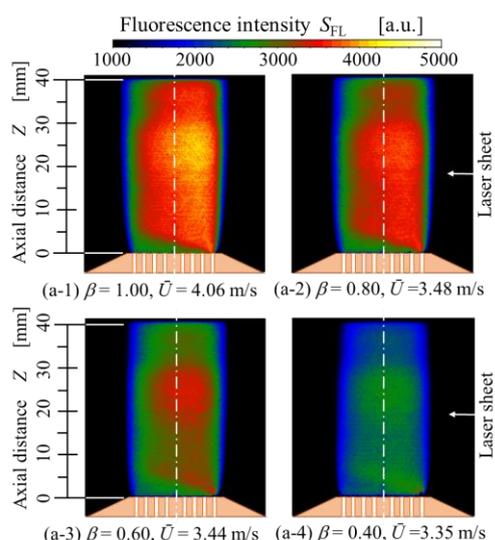


図 6 各 $\beta$ 条件に対する OH-PLIF 画像  
( $P_C=0.10$  MPa,  $\phi=1.00$ )

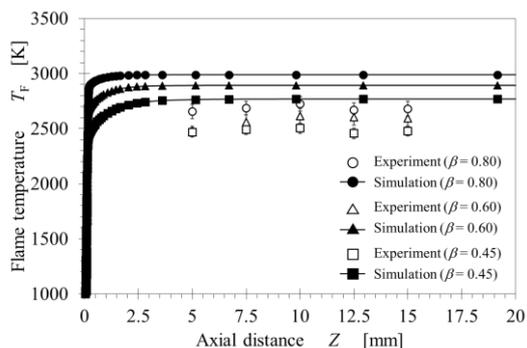


図 7 軸方向火炎温度分布  
( $P_C=0.10$  MPa,  $\phi=1.00$ )

ーシート強度分布の非一様性による影響である。また、 $\beta = 0.80$ なる条件ではノズル中心、ノズル表面より上流 1.5 mm におけるノズル内部温度を計測し、その温度は 390 K 程度であり、ノズル材質である無酸素銅の軟化温度および設計上の許容温度 470 K よりも十分に低いことがわかった。

さらに、 $\beta = 0.80, 0.60$  および  $0.45$  における火炎温度を、ボルツマンプロット法によって計測した。その結果を図 7 に示す。ここでボルツマンプロットは、OH(2,0)バンド Q1(1)~Q1(13)ブランチの各励起線の基底振動準位における回転エネルギーに対する蛍光強度から行った。図中に示されるように、各 $\beta$ 条件において、軸方向距離  $Z=5\sim 15$  mm の領域でその温度はほぼ一定であることが示されている。同図中には、一次元火炎計算によって得られた各 $\beta$ 条件における火炎温度を併せて示している。計算値と比較して、実験的に得られた温度は約 250 K 程度低いことがわかる。これは、計算において熱損失を考慮していないことほかに、計測方法そのものに起因すると考えられる。本研究におけるボルツマンプロット法による温度計測では、蛍光を検出するために、全ての励起線条件で同一の干渉フィルター (Type-A) を利用した。しかし、励起線の違いによって蛍光スペクトルは微小ではあるが変化し、全ての励起線条件で一定の蛍光検出能力を保てず、その結果、真の火炎温度よりも低い温度を算出している可能性がある。このような不確かさは存在するものの、実験的に計測された火炎温度は $\beta = 0.45$ においても 2450 K を越え、このような高火炎温度の準一次元層流火炎の形成は、他に類を見ない結果である。

次に、最高雰囲気圧力  $P_C=0.49$  MPa までの各圧力条件において取得された単発撮影 OH-PLIF 画像およびその信号強度の標準偏差分布を図 8 に示す。ここで、酸素富化率お

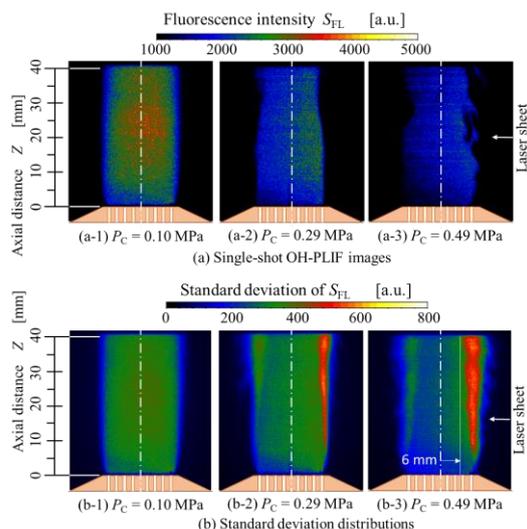


図 8 各  $P_C$  条件における単発 OH-PLIF 画像および標準偏差分布

よび当量比は全ての圧力条件でそれぞれ、 $\beta=0.45$  および  $\phi=1.00$  一定である。強度の標準偏差は各燃焼条件において取得した 100 枚の単発撮影 OH-PLIF 画像より算出した。大気圧下においては火炎後流の OH 分布は定常であったが、高圧下  $P_C=0.29$  および  $0.49$  MPa 条件では、温度および密度勾配による燃焼ガスと周囲空気の混合が促進され、燃焼ガス外周面に非定常な乱れが発生した。その様子は標準偏差分布を見ても明らかである。しかし、バーナー中心軸に対して半径方向 6 mm 以下の領域では、その乱れの影響を受けずほぼ一様とみなすことが可能である。軸方向分布に関しては全ての圧力条件で、ほぼ一様であることが観察される。一次元数値計算より、 $P_C=0.49$  MPa,  $\phi=1.00$  の火炎温度は約 2900 K と想定され、そのときのノズル内部温度は 390 K 程度であった。

バーナー上に形成される火炎の当量比変化およびその妥当性を検証するために、Type-B フィルターを利用した OH(0,0)バンド自発光強度計測を行い、数値計算によって得られた励起化学種 OH\*の分圧に値する相対モル濃度と比較した。図 9 に、各  $P_C$  条件における OH(0,0)バンド自発光強度および OH\*相対モル濃度の当量比依存性を示す。ここで、両者の値は全て、バーナー表面における熱損失の影響が少ない軸方向距離  $Z=10$  mm における値である。燃料過剰条件では外炎が形成されることから、 $\phi=0.60 \sim 1.00$  の当量比範囲を検証した。図中に示されるとおり、各  $P_C$  条件において、自発光強度と OH\*相対モル濃度は定性的に一致している。励起化学種 OH\*は、OH の濃度の他に温度に対する強い依存性を有している。従って両者の一致は、実験において形成された火炎の温度および OH 濃度の当量比変化は妥当であると考えられる。

本研究における作動圧力条件は、燃焼試験設備の容量に起因し、実際のロケット燃焼場よりも低い圧力条件での検証であった。しかし、純酸素火炎またはそれに準ずる高温火炎を高圧下において準一次的に、かつ広く一様に形成する光学計測校正バーナー設計の第一要件を達成したと考える。

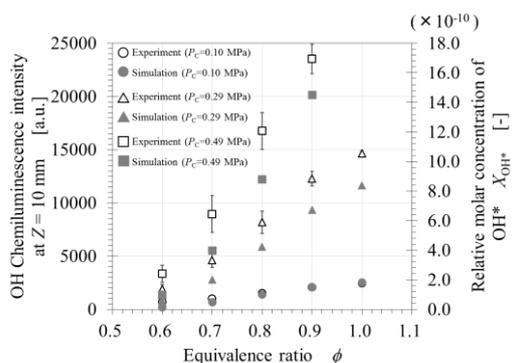


図 9 OH(0,0)バンド自発光強度および相対 OH\*モル濃度の当量比依存性

## 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 1 件)

- ① K. Takeuchi, Y. Nunome, S. Tomioka, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Application of OH(2,0) Band Excitation Planar Laser-Induced Fluorescence to High-Pressure H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Jet Flames for Rocket Combustion, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.60, No.2 (2017), pp.116-123. 査読有,

[学会発表] (計 3 件)

- ① 竹内清剛, 布目佳央, 富岡定毅, 富田健夫, 工藤琢, 早川晃弘, 小林秀昭, 高圧高温火炎に対する光学計測校正バーナーの開発, 第54回燃焼シンポジウム, 2016年11月25日, 仙台国際センター (宮城県・仙台市)
- ② K. Takeuchi, Y. Nunome, T. Tomita, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, OH(2,0) Band Excited PLIF Measurements for High-Pressure H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Jet Flames, 第53回燃焼シンポジウム, 2015年11月17日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ③ K. Takeuchi, Y. Nunome, T. Tomita, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Application of OH-PLIF Measurements Using OH(2,0) Band Excitations to High Pressure H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Jet Diffusion Flames Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference on Combustion, Beijing China, 2015年7月21, 北京 (中国)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI, Hideaki)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号：30170343

### (2) 研究分担者

早川 晃弘 (HAYAKAWA, Akihiro)  
東北大学・流体科学研究所・助教  
研究者番号：90709156