

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01256

研究課題名(和文) 高温・高圧環境におけるアンモニアの層流火炎構造と乱流燃焼機構の解明

研究課題名(英文) Laminar flame structures and turbulent flame characteristics of ammonia flames at high temperature and high pressure conditions

研究代表者

早川 晃弘 (Hayakawa, Akihiro)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：90709156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：ガスタービンなどの内燃機関においては高温・高圧環境下の乱流燃焼が用いられているため、このような環境におけるアンモニアの燃焼特性解明は重要である。本研究では、高温・高圧環境下におけるアンモニア/空気予混合気に対して、火炎構造や乱流燃焼速度などを実験的に明らかにした。さらに、高圧環境における燃焼計測に向けてLITGS(Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy)の高度化に関する研究を行い、既燃ガスの組成が計測精度に影響を及ぼすことを明らかにした。本研究で得られた知見はLITGSをアンモニア火炎に適用する場合に考慮すべき点であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラル実現に向けて、燃料としてのアンモニア利用が注目されている。本研究は燃焼器設計において重要となるアンモニア火炎の乱流燃焼特性を実験的に明らかにした。本研究の成果は燃焼器開発のための基礎的知見となることから社会的意義は大きい。またLITGSによる温度定量計測においては、計測精度の信頼性をシグナルコントラストという指標によって評価することができる可能性を示唆した。この事は、高圧環境下における燃焼計測の妥当性を検証するうえで重要である。さらに混合気組成が温度定量計測結果に影響を及ぼす事を実験的に示した事も、今後アンモニア燃焼等への研究展開において重要な点である。

研究成果の概要(英文)：Towards carbon neutrality, application of ammonia as fuel is anticipated. In a gas turbine combustor, combustion in high temperature and high-pressure conditions is employed. Therefore, turbulent combustion characteristics in high temperature and high-pressure conditions are needed to be clarified. In this study, turbulent combustion characteristics, such as instantaneous turbulent flame structure and turbulent burning velocity, were experimentally evaluated. In addition, toward the application of flame measurement in high-pressure environment, development of LITGS(Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy) were also conducted. The results suggested that the composition of product gas affects the accuracy of derived temperature using LITGS. Also, the accuracy of derived temperature can be evaluated using the signal contrast. The results obtained in this study is needed to be considered in the temperature measurement of ammonia flame using LITGS.

研究分野：燃焼工学

キーワード：アンモニア 高圧燃焼 乱流燃焼 レーザー計測 LITGS

### 1. 研究開始当初の背景

カーボンニュートラルを実現するために、水素エネルギーキャリアとしてのみならず燃料としてのアンモニア利用が注目されている。これまでに SIP プロジェクト等によりアンモニアの層流燃焼速度、旋回流燃焼器における燃焼生成ガス特性や保炎特性を明らかにしてきた。またアンモニアを燃料としたガスタービンの実証が行われるなど、研究が進んでいる。このような燃焼器内においては高温・高圧環境における乱流燃焼が行われているため、温度や圧力がアンモニア乱流燃焼特性に及ぼす影響を明らかにすることは重要である。またアンモニア燃焼特性を詳細に理解するために、アンモニア火炎構造を詳細に解明する事も重要である。

### 2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究では高温高圧環境下におけるアンモニア乱流燃焼特性の解明とレーザー計測による火炎の詳細計測を目的とする。レーザー計測手法として、乱流火炎構造の可視化には OH-PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) を、高圧環境下における火炎の詳細計測には高圧環境下における火炎温度定量計測に向けて利用が期待される LITGS (Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy) を用いた。研究の過程で燃焼場に存在する H<sub>2</sub>O が LITGS による温度計測精度に影響を及ぼす可能性が示唆されたので、LITGS 計測における計測結果の信頼性に関して詳細に検討を行った。

### 3. 研究の方法

高圧環境下における燃焼実験を、東北大学流体科学研究所に整備されている高圧燃焼試験設備を用いて実験を行った。

図1は高圧環境下のアンモニア乱流燃焼実験に用いた実験装置の模式図である。高圧燃焼容器内に出口径 20 mm のノズルバーナーを設置して、そこに定在されるアンモニア/空気予混合乱流火炎の瞬時火炎構造を OH-PLIF により計測を行った。圧力が 0.1 MPa, 0.3 MPa および 0.5 MPa の条件において燃焼実験を行った。またスポットヒーターおよびリボンヒーターを用いて加熱した高温の予混合気をバーナーに供給した。本研究ではアンモニア/空気予混合気の温度は 573 K とした。予混合気の当量比は 0.8 および 0.9 とした。

アンモニア火炎は燃焼速度が遅いため、乱流燃焼速度も低い値となる事が予想される。そのため、レーザーシートの高さを出来るだけ高くする必要があるが、それによるエネルギー密度の低下が生じ、火炎計測が困難となる。本研究では、バーナー出口中央においてレーザーシートの高さは、圧力が 0.1 MPa の条件では 100 mm, 高圧条件では 60 mm となるように調整した。OH の励起波長として、282.929 nm を用いた。

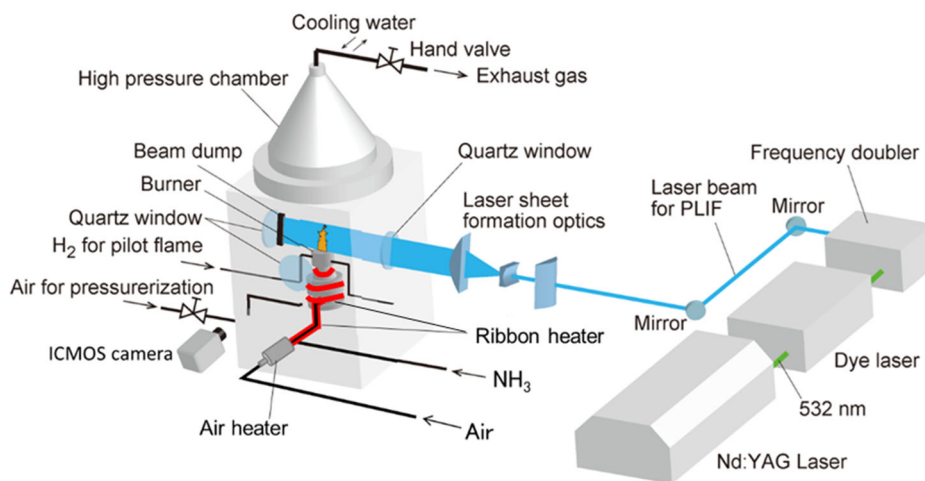


図1 高圧燃焼試験設備を用いた高温・高圧アンモニア乱流燃焼実験の模式図

図2は LITGS による高圧燃焼場の温度計測実験系の模式図である。ポンプ光には Nd:YAG レーザー (Lotis TII, LS-2147N) と色素レーザー (LIOPTEC, LiopStar-E-N) を用いて発振した 262.43 nm 付近の OH(2,0)バンドの Q1(6)枝を用いた。ポンプ光はビームスプリッター (図2中の BS) を用いて平行光に分割し、焦点距離 1000 mm の集光レンズによって、バーナー出口から 5 mm 下流の位置で交差させた。形成される格子間隔は室温におけるアセトン/空気予混合気の温度を熱電対により計測し、その温度を用いて算出した。ポンプ光のエネルギーは約 2 mJ/pulse である。プローブ光には半導体レーザー (Omicron, BrixX 445-2500 HP) から得られる 445 nm, 800 mW の光を用いた。この光をポンプ光によって形成される格子位置に Bragg 角で入射する事で、LITGS

信号を取得する。LITGS 信号光は光電子増倍管 (PMT, 浜松ホトニクス, H10720-210) を用いて検出し、オシロスコープによって記録する。なお、火炎からの自発光およびレーザーの散乱光が PMT に入射するのを防ぐため、バンドパスフィルタとロングパスフィルタを設置した。LITGS 信号は、特定の周波数で振動しながら指数関数的に減衰するような形をしている。この振動周波数を計測する事で温度を算出することができる。

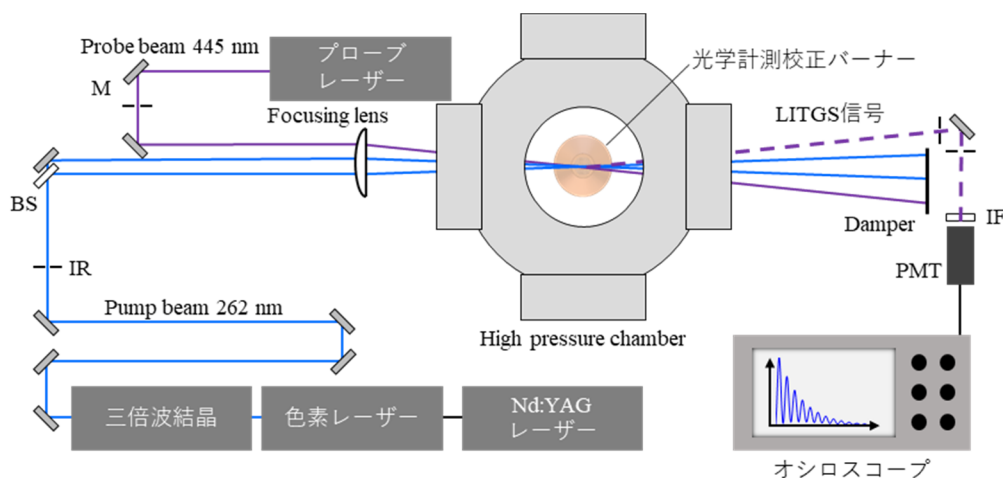


図2 LITGS による高圧燃焼場の温度計測実験系の構成

実験には研究室で開発した高圧燃焼場でも利用可能な光学計測校正バーナー[1]を用いた。本研究では、酸素富化メタン/酸素/窒素予混合火炎を対象とした。既燃ガス中の組成が温度計測結果に及ぼす影響を評価するために、酸素富化率 $\beta$ を変化させて実験を行った。ここで酸素富化率は酸素と窒素からなる酸化剤中の酸素の体積割合であり、 $\beta=1$ が純酸素燃焼、 $\beta=0.21$ が空気燃焼に対応する。燃焼実験は 0.3 MPa, 0.5 MPa および 1.0 MPa で行った。

#### 4. 研究成果

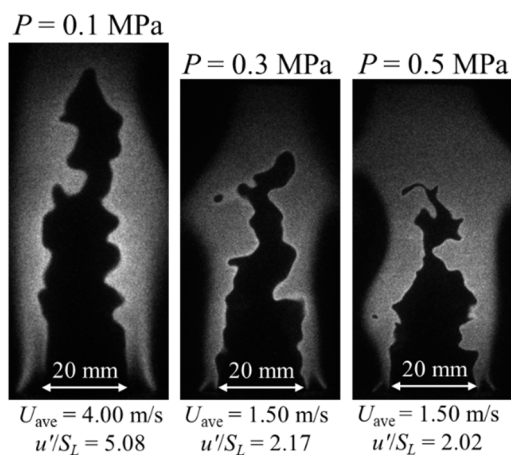


図3 アンモニア/空気予混合乱流火炎の瞬時火炎構造

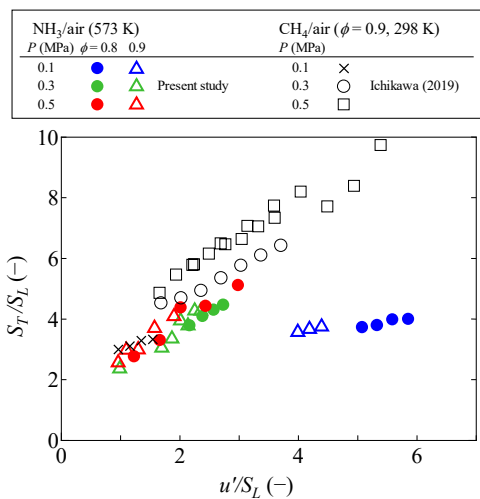


図4  $S_T/S_L$  と  $u'/S_L$  の関係

図3は OH-PLIF 法により取得されたアンモニア/空気予混合乱流火炎の瞬時火炎構造である。いずれも当量比は 0.8 である。図に示すように、圧力が高くなるにつれて火炎面に形成される凹凸のスケールが小さくなり、火炎面構造が複雑化した。

得られた瞬時火炎構造から乱流燃焼速度を取得した。図4は層流燃焼速度  $S_L$  で正規化した乱流燃焼速度  $S_T$ ,  $S_T/S_L$  と層流燃焼速度で正規化した乱れ強さ  $u'/S_L$  の関係である。図中には Ichikawa らにより得られたメタン/空気予混合気体の乱流燃焼速度も示している[2]。図のように、 $u'/S_L$  が大きくなるにつれて  $S_T/S_L$  の値は大きくなった。同一の  $u'/S_L$  においては、メタン/空気火炎よりアンモニア/空気火炎の  $S_T/S_L$  の値が小さい。これは、アンモニア/空気火炎の火炎面の凹凸スケールがメタン/空気火炎のそれに比べて大きいためであると考えられる。

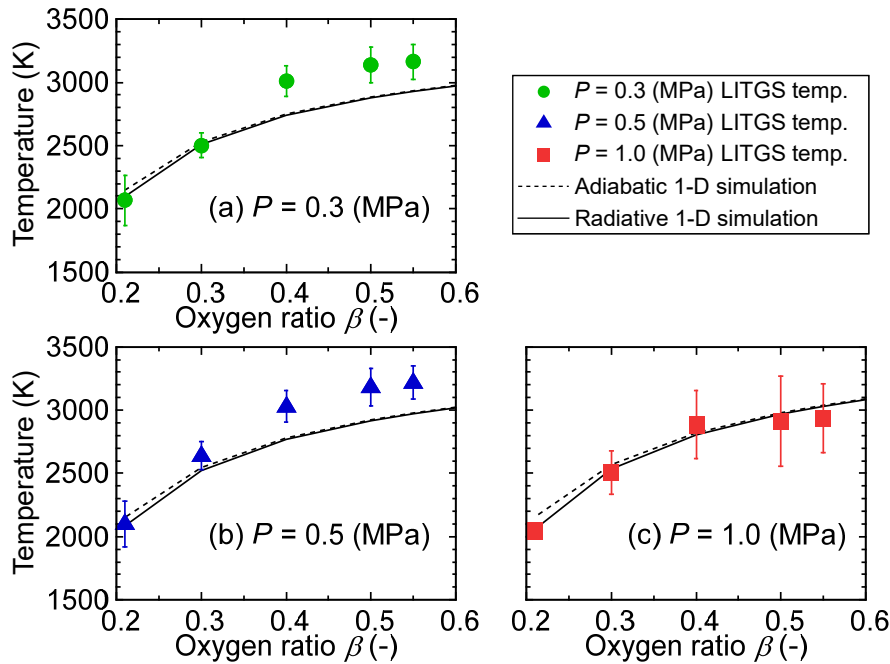


図5 LITGSによる火炎温度計測結果[3]

図5は高圧環境下における酸素富化メタン/酸素/窒素予混合火炎において酸素富化率 $\beta$ を変化させた際のLITGSにより計測した火炎温度の変化を表したものである[3]。ここで図中の実線および破線はChemkin-Proを用いて算出した火炎温度である。図のように、特に0.3 MPaと0.5 MPaの条件では酸素富化率が大きくなるにつれて、数値計算によって算出した温度と実験で計測した温度の差が大きくなった。酸素富化率が大きくなるにつれて混合気中の $H_2O$ のモル分率が増大する。このことにより、 $H_2O$ が熱格子形成のためのOHの衝突失活を阻害するためであると考えられる。1.0 MPaの条件においては、圧力が高く計測領域の化学種数密度が大きいため、理想的な熱格子形成に近づき、温度計測精度が向上したものと考えられる。アンモニア火炎においては、燃焼生成ガス中の $H_2O$ 割合が非常に高いため、本研究と同様に熱格子形成過程が理想的な状況から離れる可能性が考えられる。従って、LITGS法を用いてアンモニア火炎の温度計測を行う場合は、本研究で示された点を踏まえて火炎温度計測結果の妥当性を評価する必要があると考えられる。

図6は温度計測結果と数値計算結果の相対誤差と信号のシグナルコントラスト $\Delta I$ の関係を表したものである。図に示すように、シグナルコントラストが0.7程度以上の条件では計測結果の相対誤差が小さい。このことから、シグナルコントラストは計測結果の妥当性を評価するうえで利用可能なパラメータの一つであると考えられる。

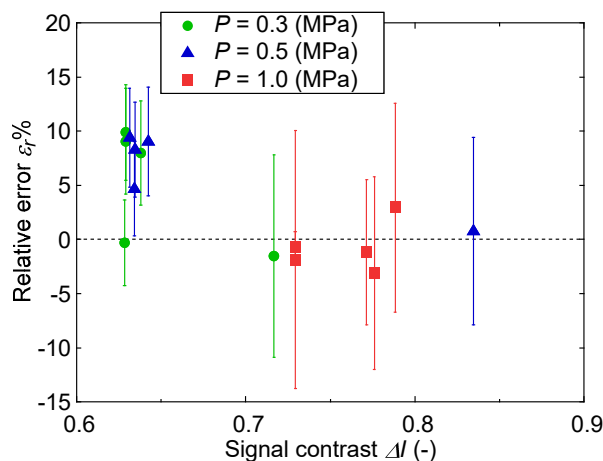


図6 温度計測結果の相対誤差とシグナルコントラスト $\Delta I$ の関係[3]

参考文献

- [1] K. Takeuchi, Y. Nunome, S. Tomioka, T. Tomita, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Development of a water-cooled multi-hole calibration burner for optical measurements of flames with high pressures and temperatures, Journal of Thermal Science and Technology, 13 (2018) 17-00478.
- [2] A. Ichikawa, PhD Dissertation, Tohoku University (2019).
- [3] 近藤 広海, 水野 裕太, 工藤 琢, 早川 晃弘,  $CH_4/O_2/N_2$  予混合火炎のLITGSによる温度計

測の精度に及ぼす雰囲気圧力と酸化剤中の酸素割合の影響, 第61回燃焼シンポジウム講演論文集 (2023) E125

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nagaoka, R. Kanoshima, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi  |
| 2. 発表標題<br>Burning velocity and flame structure of ammonia/air turbulent premixed flames at high pressure and high temperature |
| 3. 学会等名<br>1st Symposium on Ammonia Energy (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>近藤 広海, 水野 裕太, 工藤 琢, 早川 晃弘   |
| 2. 発表標題<br>CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 予混合火炎のLITGSによる温度計測の精度に及ぼす雰囲気圧力と酸化剤中の酸素割合の影響 |
| 3. 学会等名<br>第61回燃焼シンポジウム  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Kondo, Y. Mizuno, T. Kudo, A. Hayakawa  |
| 2. 発表標題<br>Effects of Oxygen Concentration of Oxygen enriched CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> Flames in Temperature Measurements using LITGS at 1.0 MPa |
| 3. 学会等名<br>14th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                  | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)          | 備考 |
|-------|--|--------------------------------|----|
| 研究分担者 | 小林 秀昭<br>(Kobayashi Hideaki)<br>(30170343) | 東北大学・流体科学研究所・教授<br><br>(11301) |    |

6. 研究組織（つづき）

|                   | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                              | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)  | 備考 |
|-------------------|--|--|----|
| 研究<br>分<br>担<br>者 | COLSON SOPHIE<br><br>(Colson Sophie)<br><br>(60898386) | 東北大学・流体科学研究所・特任助教<br><br><br><br><br><br><br><br><br>(11301) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|         |         |