

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04906

研究課題名(和文) 極限環境燃焼場に対する定量計測のためのLITGSの高度化と展開

研究課題名(英文) Advancement and application of LITGS for quantitative temperature measurement of combustion in an extreme condition

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：ロケット燃焼は圧力が10 MPa、火炎温度が3000 Kにも及ぶ代表的な極限環境燃焼である。従来の計測手法では、このような環境の燃焼計測は困難である。本研究では、高圧環境下においても利用可能と考えられるLaser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS)を適用して、最大で1.0 MPaの高圧下まで、酸素富化メタン/酸素/窒素予混合火炎の定量火炎温度計測に成功した。さらに、計測精度には光学系における交差レンズの色収差や励起レーザーエネルギーが影響する事を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

燃焼場に対する適用例が少ないLITGSを用いて、最高で1.0 MPa、火炎温度3000 Kに及ぶ酸素富化メタン火炎の定量温度計測に成功した。また、計測精度に影響を及ぼす因子も示唆された。このことから、LITGSはロケット燃焼のような極限環境燃焼に対する高精度温度定量計測の実現可能性が示唆された。極限環境燃焼の定量温度計測は、ロケット燃焼の数値シミュレーション高度化や極限環境燃焼の学理構築に寄与するものであり、LITGSはそれを実現することが可能な計測技術であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Rocket combustion is a representative combustion phenomena under an extreme condition because the orders of pressure and temperature are 10 MPa and 3000 K, respectively. Combustion measurement for such extreme condition is generally difficult using conventional laser diagnostics. In this study, it was succeeded quantitative temperature measurement of oxygen enriched methane/oxygen/nitrogen premixed flames up to 1.0 MPa using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) which is promising laser diagnostics available for high pressure combustion. In addition, it is suggested that the chromatic aberration of the crossing lens used in LITGS optics and laser intensity of the pump beam are important for the accuracy of temperature measurement using LITGS.

研究分野：燃焼工学

キーワード：レーザー計測 定量計測 温度計測 高圧燃焼 ロケット燃焼 非接触 励起波長

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火炎温度は燃焼現象において最も重要な物理量の一つであるため、その定量計測は重要である。これまでもレーザー誘起蛍光計測などの非接触レーザー計測法によって計測が行われている。しかしながら、特にロケット環境のような圧力が 10 MPa、火炎温度が 3000 K にも至るような極限環境燃焼場に対しては、火炎の自発光強度の増大など計測を困難にする物理因子の存在などにより計測が困難である。

2. 研究の目的

本研究では、ロケット燃焼のような極限環境下に対する非接触計測手法として Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy(LITGS)の利用を提案する。LITGS においては、励起化学種のクエンチングによって生じた密度微小摂動と音響波との相互作用による密度変動を信号として取得する。高圧下においては励起化学種のクエンチング速度が増大することから、高圧環境下においては LITGS 信号強度が大きくなるものと考えられる。そこで本研究では、LITGS を高圧環境下における燃焼場に適用し、極限環境下における燃焼現象理解のための LITGS による計測手法の高度化を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、上述の目的を達成するために、高圧環境下における燃焼実験を実施した。実験には、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た。また研究代表者が所属する研究室で開発した高圧環境下でも利用可能な高圧校正バーナー[1]を用いて、酸素富化条件における予混合燃焼試験を行った。

またこれまでの研究代表者らの検討から、LITGS 信号強度が励起化学種濃度と関係することが考えられている。すなわち、事前に LITGS 信号と化学種濃度との関係を調べておくことで、温度・濃度の同時定量計測が可能になるものと考えられる。これについて検討を行うために、濃度の制御が容易な小型定容容器を用いて、様々な励起化学種濃度における LITGS 信号について評価を行った。

4. 研究成果

(1) 高圧燃焼場に対する LITGS による定量温度計測とその高度化

図 1 に本研究で構築した高圧燃焼場に対する LITGS による定量温度計測実験の装置・光学系の模式図を示す。

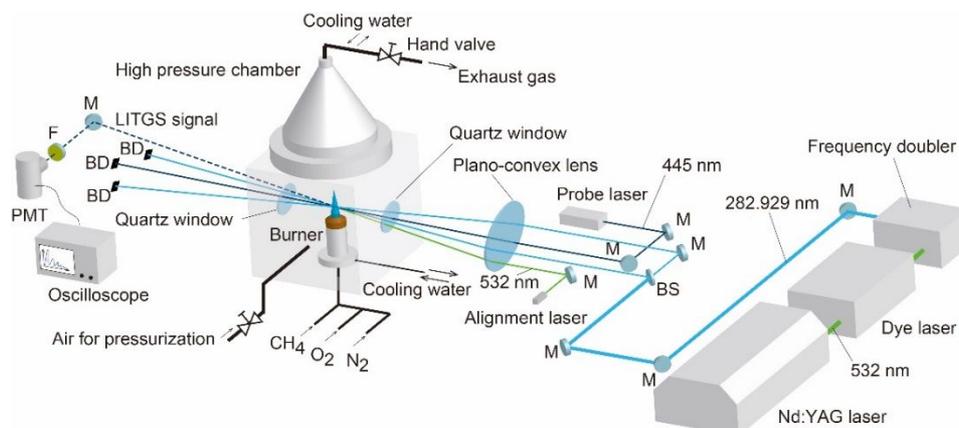


図 1 LITGS による高圧燃焼場に対する定量温度計測実験模式図

実験では、Nd:YAG レーザー (Spectra-Physics GCR-250) から発振したレーザー光を倍波発生装置付き色素レーザー (Lumonics HD500+HT1000) で OH(1,0)バンドの Q1(6)ブランチである 282.929 nm に変換したものを励起レーザーとして用いた。またプローブレーザーには 445 nm の光を発振する半導体レーザー (RGB-laser system, NovaPro) を用いた。これらが交差レンズ (図中の Plano-convex lens, 焦点距離 1000 mm@546.1 nm) によって計測点で交わるように調整を行う。計測点である燃焼場から回折したプローブレーザー (LITGS 信号光) は干渉フィルターにおいて信号光以外の波長の光は遮断した後、光電子増倍管 (PMT, 浜松ホトニクス R928) に入射させた。LITGS 信号はオシロスコープ (Keysight, DSOS054A) により取得した。

バーナーは直径 0.4 mm の細孔が 211 個開けられている高圧校正バーナーを用いた。バーナーは無酸素銅製であり、水冷されている。燃焼実験は酸素富化率 β が 0.6 の酸素富化メタン / 酸素 / 窒素予混合気を用いて行った。ここで酸素富化率は酸素および窒素の混合気中の酸素の割合であり、空気ではおよそ 0.21 である。高圧容器内を加圧することによって、圧力 P が 0.3 MPa、0.5 MPa および 1.0 MPa までの高圧燃焼実験を実施した。

図 2 は計測した代表的な LITGS 信号である。このように、最大で 1.0 MPa の高圧下まで LITGS 信号を取得することに成功した。

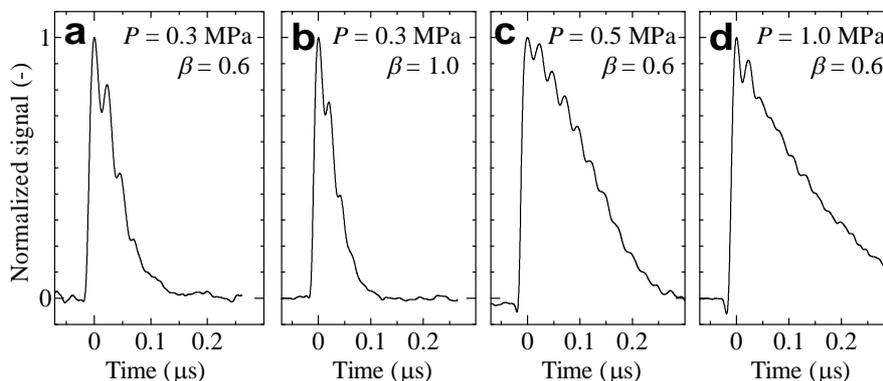


図2 計測した代表的な LITGS 信号の例 (当量比 $\phi = 0.6$)

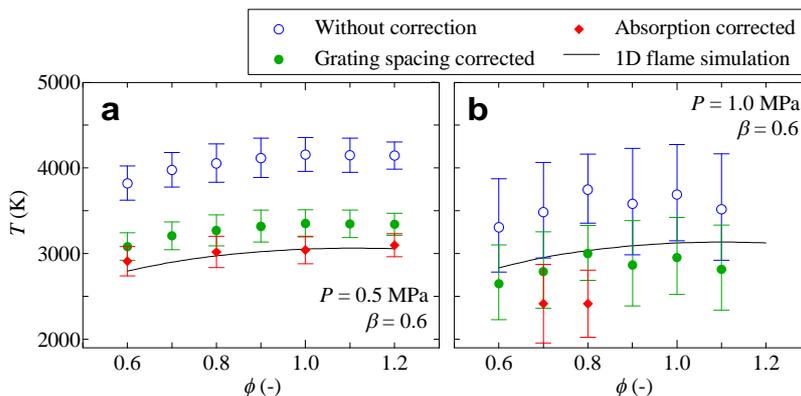


図3 計測された火炎温度と数値計算結果との比較

得られた LITGS 信号の周波数を解析することによって火炎温度を求めた。図3は圧力 0.5 MPa および 1.0 MPa における、計測された火炎温度と数値計算により求めた火炎温度とを比較した結果である。

図3における○が LITGS 信号の振動周波数から直接求められた火炎温度である。いずれも数値計算で求めた火炎温度を大幅に上回っている。図1に示した実験装置において、励起レーザーとプローブレーザーは交差レンズを通して燃焼場に入射される。計測点において形成されるフリンジの間隔はこの焦点距離を用いて求められる。しかしながら本研究で用いた交差レンズは 546.1 nm の波長の光を入射した場合に焦点距離が 1000 mm となるものであるため、特に紫外光である励起レーザーは色収差の影響により、真の焦点距離はこの距離より短くなる。そこで温度が既知の低濃度アセトン蒸気に対して LITGS 計測を行い、計測された温度からフリンジ間隔を逆算した。これから求めた温度が図3の である。さらに、励起レーザーエネルギーが大きくなるにつれて計測される温度が高くなる現象が確認された。この励起レーザーエネルギーの影響についても補正を行った結果を 示している。このように LITGS 計測においては、色収差の影響と励起レーザーエネルギーの影響についても検討することが高精度の温度計測に重要であることが示唆された。

このような励起レーザーエネルギーの影響を詳細に検討するために、OH(1,0)バンドより高い吸収スペクトルを有する 308 nm 付近の OH(0,0)バンド励起による LITGS 計測を実施した。この実験において、励起用レーザーは Nd:YAG レーザー (Lotis TII, LS-2147A) と色素レーザー (Spectron, SL4000G-A) を用いて発振させた。この実験において、酸素富化率は 0.55、当量比は 1.0 とした。図4に圧力 1.0 MPa においてレーザーエネルギーを変化させた場合の LITGS により計測した火炎温度を示す。本研究では OH(0,0)バンドのうち吸収スペクトルの異なる $Q_1(7)$ ブランチである 308.979 nm、 $Q_1(6)$ ブランチである 308.726 nm および $R_2(20)$ ブランチである 308.903 nm の励起波長を用いた。これらの励起波長は、LIF 計測において蛍光強度のカウ

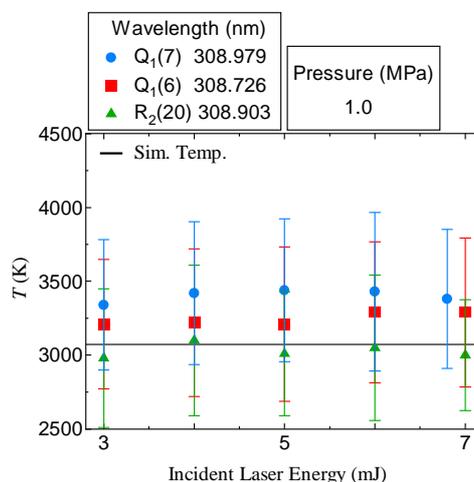


図4 1.0 MPa における LITGS 計測結果

ント値が極大となった波長であり、蛍光強度は $R_2(20) < Q_1(6) < Q_1(7)$ の順で大きくなった。図 4 のように、LITGS によって計測される温度は励起波長が $R_2(20)$, $Q_1(6)$, $Q_1(7)$ の順に高くなった。これは励起波長を決定する際の LIF 信号強度の順番と等しい。すなわち、吸収スペクトルが大きく蛍光強度の大きいレーザー波長をもちた場合、化学種に吸収されるエネルギーが増大し、それによって計測位置における局所的な温度上昇が生じたため、このような温度上昇が観察されたものと考えられる。この点は、OH(1,0)バンドにおける実験結果からも類推することが出来る。しかしながら、図 4 においては入射レーザーエネルギーを変化させても計測される火災温度はほぼ一定であった。本研究において OH(1,0)バンド励起における実験と OH(0,0)バンド励起における実験では用いたレーザーのパルス時間とレーザービーム直径が異なる。これらが計測される温度に及ぼす影響については、今後さらなる検討を要する。

(2) 小型定容容器を用いた LITGS による定量濃度計測に関する検討

NO を励起化学種として、小型定容容器を用いて、非燃焼場における LITGS による温度計測を行った。図 5 に本実験で用いた実験装置の模式図を示す。

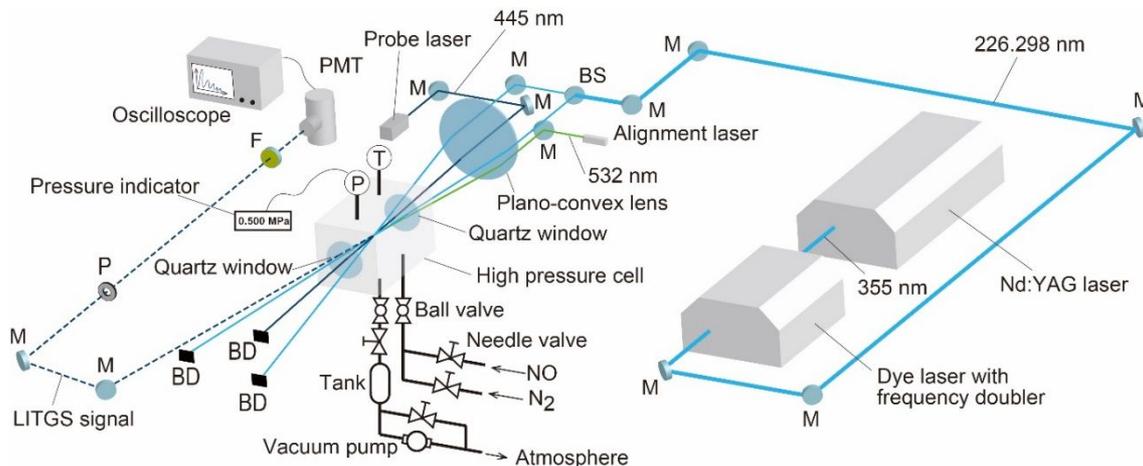
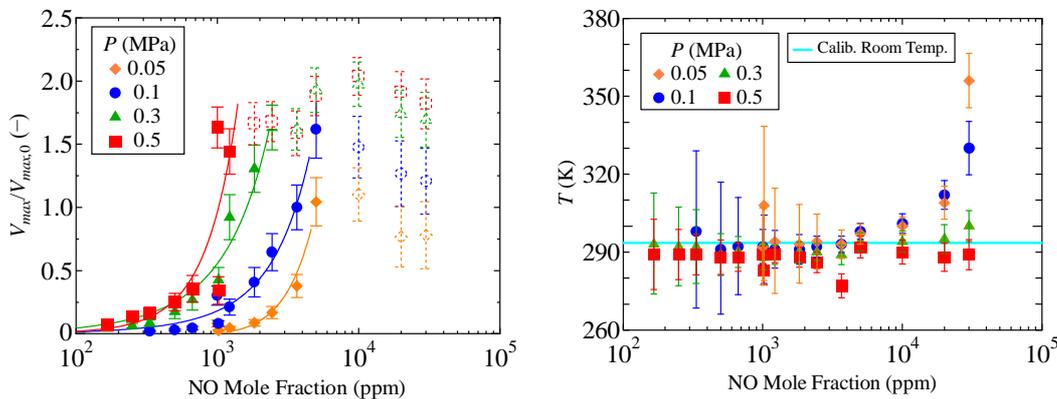


図 5 小型定容容器を用いた NO-LITGS 実験装置

励起レーザーとして Nd:YAG レーザー (Spectra Physics, GCR250) から発振した 355 nm の光を色素レーザー (Sirah, PrecisionScan) を用いて波長を 226.298 nm としたレーザー光を励起レーザーとして用いた。計測部には直径 20 mm、長さ 40 mm の円筒状のガス封入部を有する小型定容容器を設置した。分圧充填することで、励起化学種濃度を任意に設定することが出来る。小型定容容器には圧力センサーおよび熱電対が設置されており、内部の温度も同時に計測し、LITGS によって計測した温度と比較することが出来る。それ以外の部分については、図 1 に示した実験装置と同様である。励起化学種として NO を、希釈ガスとして N_2 を用いた。実験は室温条件下において行われた。

LITGS 信号波形を示す事はここでは省略するが、様々な圧力および濃度条件において NO/ N_2 混合気から LITGS 信号を取得することに成功している。LITGS 信号の信号最大値は、計測対象が高圧であるほど、また NO モル分率が高いほど大きくなった。しかしながらいずれの圧力条件においても、あるモル分率以上においては、NO モル分率が増加しても LITGS 信号の最大値はほぼ一定となった。



(a) LITGS 信号最大値との関係

(b) 計測された温度との関係

図 6 NO-LITGS における NO モル分率の影響

図 6 に NO モル分率を変化させた場合における(a)LITGS 信号最大値と(b)計測される温度との関係を示す。ここで図 6a においては、NO-LITGS 信号の最大値 V_{max} は、圧力 0.1 MPa、NO モル分率が 3660 ppm における信号最大値 $V_{max,0}$ において正規化している。また図 6b 中の横線は、圧力 0.1 MPa、NO モル分率が 3660 ppm の計測時の温度であり、温度計測時に重要となるフリンジ間隔の補正はこの条件を用いて行った。上述のようにある程度以上 NO モル分率が增大すると NO-LITGS の最大値はほぼ一定の値となった。このような信号最大値が一定となった条件を図 6a では白抜きの記号で表している。NO-LITGS の最大値が一定となっていない条件(塗りつぶしの記号で表している条件)に着目すると、NO-LITGS 信号の最大値は、片対数グラフ上において二次関数的に増大した。また図 6b に示すように、様々な NO モル分率条件において温度計測に成功した。以上から、あらかじめ図 6a に示すような NO 濃度と LITGS 信号の最大値との関係を求めておくことで、計測対象における励起化学種濃度と温度の同時定量計測が実施できる可能性が示唆された。

< 引用文献 >

- [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, Vol. 13, No. 1 (2018) 17-00478.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 A. Hayakawa, T. Yamagami, K. Takeuchi, Y. Higuchi, T. Kudo, S. Lowe, Y. Gao, S. Hochgreb, H. Kobayashi | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Quantitative Measurement of Temperature in Oxygen Enriched CH ₄ /O ₂ /N ₂ Premixed Flames using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) up to 1.0 MPa | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute | 6. 最初と最後の頁 1427-1434 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.009 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Hayakawa, T. Yamagami, K. Takeuchi, Y. Higuchi, T. Kudo, S. Lowe, Y. Gao, S. Hochgreb, H. Kobayashi |
| 2. 発表標題 Quantitative Measurement of Temperature in Oxygen Enriched CH ₄ /O ₂ /N ₂ Premixed Flames using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) up to 1.0 MPa |
| 3. 学会等名 37th International Symposium on Combustion (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Kohama, A. Hayakawa, T. Yamagami, Y. Kudo, S. Hochgreb |
| 2. 発表標題 Quantitative Temperature Measurement of NO/N ₂ Mixtures in Non-Combustion Field using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy |
| 3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Hayakawa, S. Lowe, T. Yamagami, T. Kudo, Y. Gao, S. Hochgreb |
| 2. 発表標題 Quantitative Measurement of Temperature using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy with OH or NO Excitation |
| 3. 学会等名 Gordon Conference - Laser Diagnostics in Combustion - (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Hayakawa, S. Lowe, T. Yamagami, T. Kudo, Y. Gao, S. Hochgreb |
| 2. 発表標題 Quantitative Measurement of Temperature using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy with Resonant Excitation of Nitric Oxide |
| 3. 学会等名 The Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 早川晃弘, 山上朋恭, 竹内清剛, 樋口靖浩, 工藤琢, S. Lowe, 高怡, S. Hochgreb, 小林秀昭 |
| 2. 発表標題 Laser Induced Thermal Grating Spectroscopyによる酸素富化CH4/O2/N2予混合火炎の高圧下における定量温度計測 |
| 3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2018年講演会ならびに第19回再使用型宇宙推進系シンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Hayakawa, K. Kohama, T. Yamagami, T. Kudo |
| 2. 発表標題 Temperature measurement of NO/N2 mixture in a constant volume cell for various NO concentrations and pressures using LITGS |
| 3. 学会等名 Laser Diagnostics in Energy and Combustion Science, Gordon Research Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |