

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18820

研究課題名(和文)トレーサ粒子を用いない革新的非接触流速計測手法確立と多様な流動場に対する適用

研究課題名(英文)Development of an innovative laser velocimetry without tracer particles and its application for various flow fields

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) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：ロケット燃焼等の高温・高圧環境下における燃焼現象理解のためには非接触のレーザー計測技術の高度化が不可欠である。本研究では高圧下の燃焼計測にも適用可能と考えられるLITGS(Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy)を応用し、トレーサ粒子を添加することなく流速を計測する方法を確立することを目的とする。本研究では、FFTによる信号解析手法、ヘテロダイン検出法によってレーザー光の周波数変調を検出する方法など、流速計測に向けた基盤技術を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケット開発を加速するために、ロケットエンジン内で生じている極めて高温・高圧環境下における燃焼現象の理解は重要である。そのためには、火炎温度や流速などの計測技術の高度化が不可欠である。本研究によって、高圧燃焼にも利用可能と考えられるLITGS法を応用し、従来多くの非接触流速計測手法で用いられているトレーサ粒子を添加することなく、流速を計測するための基盤技術を構築することができた。これによりロケットエンジン内の燃焼の理解が進むことで、数値シミュレーションの高度化などが期待される。

研究成果の概要(英文)：Development of laser diagnostics is essentially important to understand the combustion phenomena at extremely high pressure and high temperature environments, such as rocket motor. In this study, we focused on LITGS (Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy) which is potential laser diagnostics available for high pressure environment is applied to the velocity measurement. The purpose of this study is to develop the velocity measurement method without tracer particles based on LITGS. Towards the objectives, we developed signal analysis method using FFT and the detection method of frequency modulation using heterodyne detection. The results obtained in this study are the fundamental technique for velocity measurement using LITGS with no tracer particles.

研究分野：燃焼工学

キーワード：流速計測 レーザー計測 LITGS ヘテロダイン検出

1. 研究開始当初の背景

燃焼現象を理解するためには、実験によって火炎温度の定量計測を行うことは重要である。しかしながら、熱電対を燃焼場に挿入するなどといった接触計測は、燃焼場を乱す恐れがあるので望ましくない。そのため、レーザーを用いた非接触計測が重要となる。ロケット燃焼は圧力のオーダーが 100 気圧、火炎温度のオーダーが 3000 K となるような代表的な極限環境燃焼である。圧力が高くなるにつれて火炎からの自発光が著しく増大する事やスペクトルのブロードニングといった計測を困難にする物理現象が存在するため、レーザーを用いた計測は一般に困難になる。このような高温・高圧の極限環境燃焼場に対する計測技術として、Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) の利用が注目されている。この方法は、励起化学種が衝突失活によって基底準位に戻る際にクエンチングにより生じる熱発生とそれに伴う局所的な密度変調が生じているような場に対して、このような場を伝播する圧力波の音速から温度を算出する方法である。圧力が高くなるにつれてクエンチング速度は増大するため、LITGS 信号強度も、圧力が高くなるにつれて増大する事が期待されており、極限環境燃焼に対するレーザー計測技術として利用可能であると考えられる。これまでに、圧力 1.0 MPa までの酸素富化メタン火炎に対する火炎温度計測を行っている[1]。

また、流速も燃焼現象の解明には重要である。従来は PIV (Particle Image Velocimetry) や LDV (Laser Doppler Velocimetry) のように、流れ場にトレーサ粒子を添加して、トレーサ粒子が十分流動に追従していると仮定して、トレーサ粒子の動きを計測することで流れ場の流速を計測する方法が広く用いられている。しかしながらこの手法では、流れ場にトレーサ粒子を添加しなければならないため実験は困難となる。さらにトレーサ粒子が実験装置に混入して、機器の故障の原因となる恐れがある。また高圧燃焼場に対する計測では観測窓の汚れなどが発生する恐れがある。そのため、トレーサ粒子を添加することなく流速を計測する手法の確立が求められている。

2. 研究の目的

Walker らは LITGS を応用し、トレーサ粒子を添加することなく流速を計測する事に成功している[2]。そこで本研究は、ロケット燃焼を想定した極限環境燃焼場の理解に向けて、トレーサ粒子を添加することなく、流速を計測する技術の確立することを目的とする。このような極限環境燃焼は燃焼現象の計測自体が困難であるため、燃焼現象が十分に理解できていない。また、数値シミュレーションの妥当性を評価する実験結果も少ない。LITGS や、それを応用した計測手法を確立することで、ロケット燃焼に代表される極限環境燃焼現象の物理解明に資するものと考えられる。

3. 研究の方法

図 1 に LITGS を用いた流速計測の計測部の模式図を示す。

LITGS を用いた流速計測においては、計測領域に形成された格子が計測領域の流速によって移動した際、移動している格子によって回折された信号光が生じるドップラーシフトを検出することで、流速を求める。この流速計測においては、信号光の周波数変調を捉える必要がある。通常 LITGS 計測においては、微弱な信号を検出するために光電子増倍管 (PMT) が用いられる事が多い。しかしながら、光の周波数を検出するには PMT の時間応答性は不十分である。そのため、このようなドップラーシフトを検出する方法として、ヘテロダイン検出法が知られている[3]。ヘテロダイン検出法では、周波数変化を検出した信号光とは別に、既知の周波数を有する参照光を PMT に入射する。これによって、非常に周波数の高い光の周波数変調を、周波数の低いなり (ビート信号) として検出する事が可能になる。

本研究では LITGS による流速計測を実現するために、(1) LITGS 信号の振動周波数や周波数変調を捉える事ができる信号解析手法の構築、(2) 計測対象となる化学種を幅広い流速範囲で噴出する事の出来る実験系の構築、(3) ヘテロダイン検出を用いた周波数変調の検出手法基盤技術構築の 3 項目を実施した。

4. 研究成果

4. 1 LITGS 信号の振動周波数や周波数変調を捉える事ができる信号解析手法の構築

これまで実施してきた研究[1]において、LITGS 信号の振動周波数は、信号が極大値もしくは極小値となる時間を求め、その振動周期を求める事で算出した。しかしながら本研究で実施する

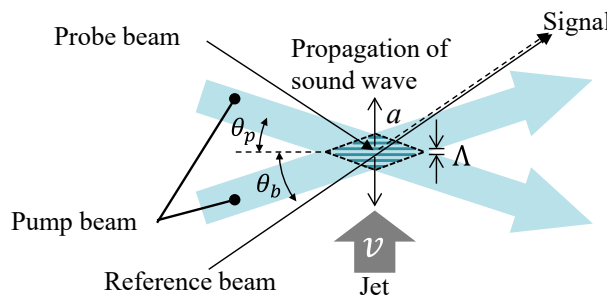


図 1 LITGS を用いた流速計測の模式図

ヘテロダイン検出法によって信号光のドップラーシフトを求める場合、ビート信号の周波数が信号の極大値や極小値からは求められない事が懸念された。そこで、FFT法による周波数解析プログラムを新たに構築した。

FFT法の課題として、周波数分解能があまり高くない事が挙げられる。FFT法の周波数分解能を向上させるために、0データを追加してデータ長を長くする方法が挙げられる[4]。しかしながら、本研究において予想されるドップラーシフトが数MHzのオーダーであることから、周波数スペクトルを確認するには十分であると判断し、0データの追加による周波数分解能の向上は実施していない。しかしながら、今後の温度や流速計測精度のさらなる向上のためには必要であると考えられる。

4. 2 計測対象となる化学種を幅広い流速範囲で噴出する事の出来る実験系の構築

本研究では幅広い吸収スペクトルを有するアセトンを用いた励起化学種として、非燃焼場におけるアセトン/空気噴流の流速計測を目指して研究を実施した。図2は、アセトン/空気噴流を製作するための実験装置の模式図である。

アセトンはタンク内に液相で充填されており、空気で加圧する事によって押し出す。マスフローメーターおよびニードルバルブを用いて所定の流量でアセトンを供給する。アセトンを気化させるために、カートリッジヒーターを用いて配管を加熱した。また、気化したアセトンが再凝縮するのを防ぐために、空気と混合するまでの配管はリボンヒーターで加熱した。マスフローコントローラーで流量を制御した空気を実験系に供給する。計測を行った際に、LITGS信号強度が周期的に変動する現象が見られた。これはアセトンと空気の混合が不十分であるために生じているのではないかと考えた。この影響を軽減するためにバッファータンクを設けた。さらに、アセトン/空気噴流の温度が室温と同程度になるように、15mの銅配管による冷却部を設けた。噴流温度は、ノズル上流の熱電対により計測した。アセトン/空気混合気はノズルを通して噴射される。本研究では、混合気中に含まれるアセトンのモル分率が3%になるようにアセトンおよび空気の流量を制御した。本実験系では、供給流量から計算される最大流速が200 m/sまでの高速噴流を形成する事が出来ることを確認した。

図2のように本研究で構築したアセトン噴流実験系は、アセトン/空気噴流を鉛直上向きに噴出する実験系である。ドップラーシフトを生じさせるためには、流れ場の主流方向を横切るように熱格子を形成する必要がある。図3は本研究で構築したヘテロダイン検出系を含むLITGS光学系の模式図である。

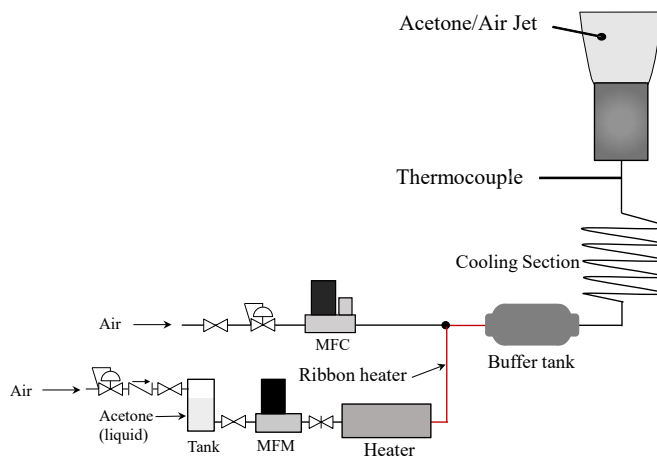


図2 アセトン空気噴流実験系

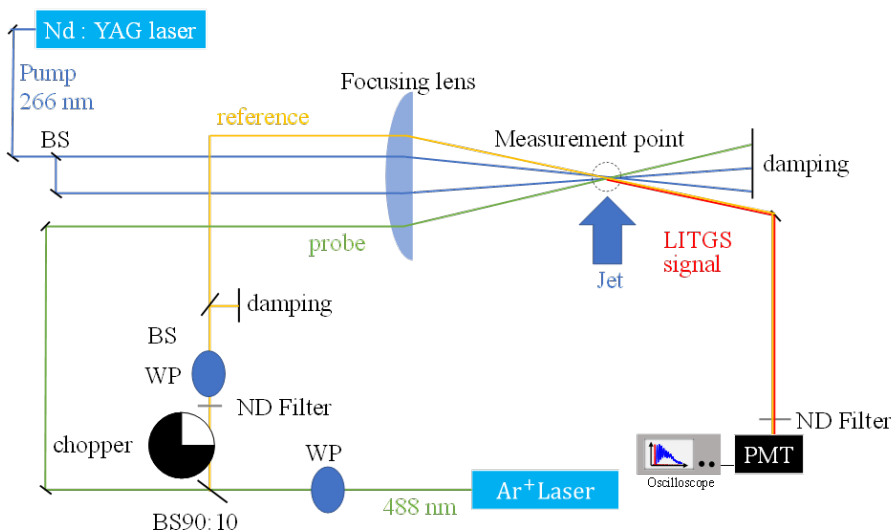


図3 ヘテロダイン検出系を含むLITGS光学系の模式図

励起光には Nd:YAG レーザー (Lotis TII, LS-217N) から発信される 4 倍波である波長 266 nm のパルス光を用いた。出力は 4 mJ/pulse である。またプローブ光と参照光にはアルゴンイオンレーザー (LEXEL, LEXEL 95-4) をシングルモードで発振した 488 nm の波長の光を用いた。出力は 180 mW である。また集光レンズの焦点距離は 700 mm とした。本研究ではヘテロダイン検出を行うため、アルゴンイオンレーザーから発信される連続光を、プローブ光と参照光に分離する。この時、参照光の強度を任意に変化させることができるように、半波長板と偏光ビームスプリッターを用いた。さらに、PMT の光電面に入射されるエネルギー量を最小とするために、CW 光であるアルゴンイオンレーザーのビームをオプティカルチョッパー (Thorlabs, MC2000B) および ND フィルタを用いて強度調整を行った。オプティカルチョッパーを参照光が通過するタイミングが励起光の入射されるタイミングに合うように、ディレイジェネレータ (Stanford Research Systems, DG645) およびオプティカルチョッパーのドライバーに内蔵されたディレイを用いて調整した。

このような実験系から予測されるドップラーシフト量は、本実験系で実施できる最高流速である 200 m/s において約 10 MHz となる。

図 4 は、200 m/s のアセトン／空気噴流において計測された信号波形と FFT 法によって得られた周波数スペクトルである。ここでは、噴流においても LITGS 信号を取得できるかどうかを確認するために、ヘテロダイン検出を行わずに LITGS 計測を実施した。

図 4 に示すように、200 m/s の流速においても十分な強度の LITGS 信号が検出された。従って、本研究で構築した実験系においても、LITGS による温度計測は可能である。次に、信号に対して参照光を合わせてヘテロダイン検出による流速計測を試みた。その結果、予想される周波数シフト量に近い周波数変調が見られたが、4. 3 節に述べる音響光学変調器 (AOM) を用いたヘテロダイン検出法の検証実験結果を踏まえると、目的とする物理現象によって得られた周波数シフトではない可能性がある。そのため、得られた結果については今後詳細に検証する必要がある。

4. 3 ヘテロダイン検出を用いた周波数変調の検出手法基盤技術構築

これまで述べてきたように、ヘテロダイン検出法を用いる事で信号光のドップラーシフトを検出する事が出来るものと考えられる。しかしながら、4. 2 節で構築した実験系によって、ヘテロダイン検出によって適切にドップラーシフトを検出できているかどうかについては検討を要する。そこで、音響光学変調器 (AOM) を用いて、任意の変調量を与えた信号光の周波数シフトを、ヘテロダイン検出によって計測することで、ヘテロダイン検出光学系が適切に構築されているかどうかの確認を行う。

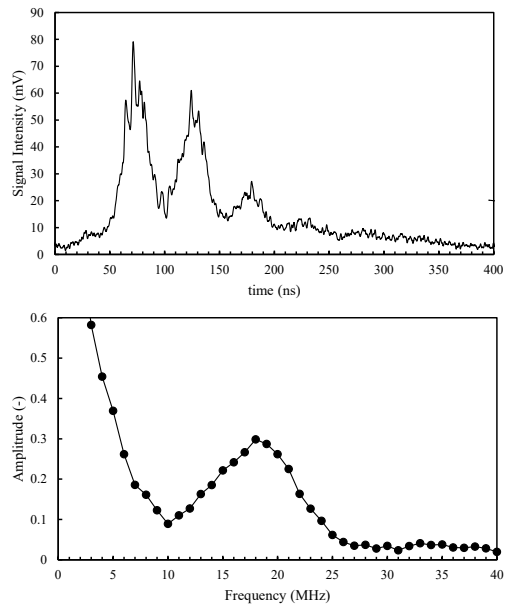


図 4 流速 200 m/s のアセトン空気噴流場における LITGS 計測結果

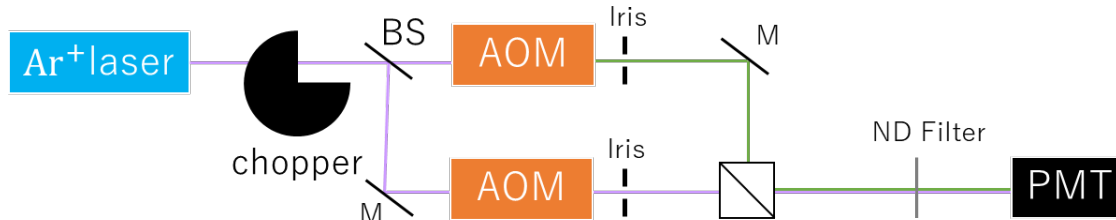


図 5 AOM を用いたヘテロダイン検出系検証のための光学系

図 5 に本研究で構築した、AOM を用いたヘテロダイン検出系検証のための光学系の模式図を示す。検証用のレーザー光として、アルゴンイオンレーザー (LEXEL, LEXEL 95-4) から発信される連続光を用いた。出力は 10 mW である。発振された光をオプティカルチョッパーで TTL 状にしたのちに、ビームスプリッターにより分離する。これらの光を AOM (Isomet, M1201-SF40-1.7V) に導く。2 台の AOM でそれぞれ 49.96 MHz と 30.00 MHz の周波数変調を与える。AOM

から出てくる光のうち、一次回折光のみを用いる事ができるように虹彩絞りを設けた。これらの光を混合させて PMT に導入する。本研究では上記の周波数変調を与えているので、正しくヘテロダイン検出が行えている場合は、19.96 MHz のビート信号が検出される。本研究で用いたアルゴンイオンレーザーの線幅は約 150 MHz であるので、コヒーレンス長は約 2 m である。本研究では、2 光路間の光路差が出来るだけ小さくなるように光学系を構築した。

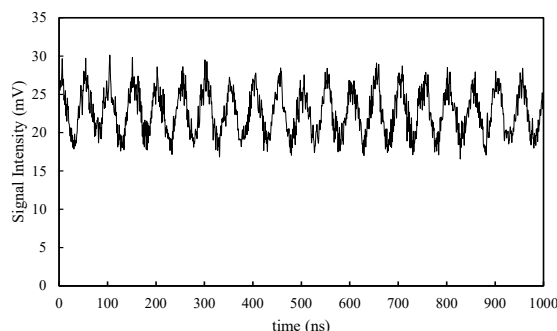


図6 ヘテロダイン検出系により計測したビート信号

図6に本研究で構築したヘテロダイン検出系により計測したビート信号を示す。このように、明確な振動数を有する信号を取得する事が出来た。この信号を FFT により周波数解析を行った結果を図8に示す。

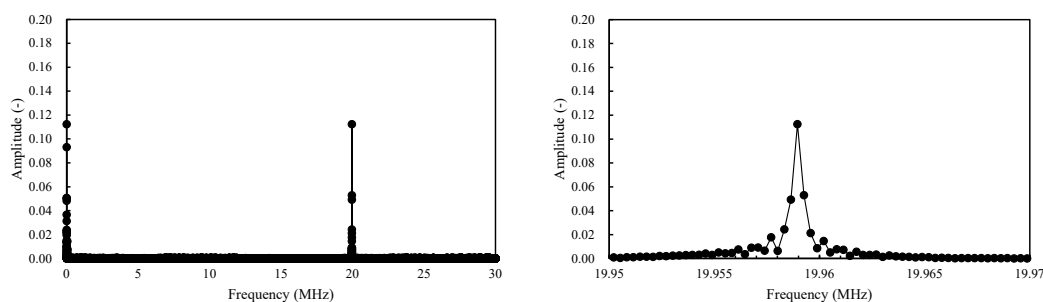


図7 ビート信号のFFT解析結果

図7に示すように、19.96 MHz 付近にスペクトルのピークが観察される。これは AOM で生じさせた変調量から予想される周波数に一致している。このことからヘテロダイン検出系は正しく構築する事が出来たと考えられる。

4. 2 節で実施した実験においては上述のように、予想される周波数変調に近いスペクトルのピークが観察された。しかしながら、4. 3 節の実験で実施を行ったよりも光路差が大きかったため、取得された信号がビート信号であったかどうかは詳細な検討を要する。

4. 3 節で述べたように、ヘテロダイン検出系は構築できた。しかしながら本研究で使用しているアルゴンイオンレーザーの出力が4. 2 節の実験を行って以降、大幅に低下してしまい、十分な強度の LITGS 信号が取得できない恐れがある。従って、今後は線幅の狭く（コヒーレンス長が長く）、高エネルギーのレーザー光をプローブ光および参照光として利用できれば、LITGS を用いた流速計測が可能であるものと考えられる。

<参考文献>

- [1] A. Hayakawa, T. Yamagami, K. Takeuchi, Y. Higuchi, T. Kudo, S. Lowe, Y. Gao, S. Hochgreb, H. Kobayashi, Quantitative measurement of temperature in oxygen enriched CH₄/O₂/N₂ premixed flames using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) up to 1.0 MPa, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 1427-1434.
- [2] D.J.W. Walker, R.B. Williams, P. Ewart, Thermal Grating Velocimetry, Optics Letters, 23 (1998) 1316 – 1318.
- [3] 左貝潤一, 光計測入門, 森北出版, 2016, P. 87.
- [4] 日野幹夫, スペクトル解析, 朝倉書店, 1977, P200.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------