

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760170

研究課題名(和文) 気体燃料噴流中における液体燃料の着火特性に関する可視化研究

研究課題名(英文) The study of ignition of liquid fuel injection in a gas fuel jet

研究代表者

鶴 大輔 (TSURU, Daisuke)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・助教

研究者番号：10614620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：船舶の排出ガスに対する排出ガス規制と地球温暖化防止の観点から、天然ガスを燃料とする船舶用ガスエンジンが注目されている。大型船舶機関への天然ガス適用における燃焼法の一つである筒内ガス直接噴射方式(GI)において、気体燃料中に噴射される液体燃料の着火が気体燃料の燃焼特性に及ぼす影響を確認することを目的とする。その結果、液体燃料の噴射時期は、ある適正な時期があり、早期に噴射してもメタン燃焼に与える影響は少ないが、遅くなると急峻な熱発生が生じると噴射量を減少させても、着火後のメタンの燃焼への影響は少ないことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：From the point of view of global warming and emissions regulations for ships engines, marine gas engine has been developed for using natural gas instead of liquid diesel fuel. The purpose of this study is to reveal the effect of ignition of liquid fuel injection condition to methane gas combustion in injected high-compressed gas directly into the combustion chamber. The experiment results show that the late injection timing of the liquid fuel cause a steep rate of heat release and reduction of injection amount has a small effect to the methane combustion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：船舶機関 ディーゼル噴霧 ガス噴流

1. 研究開始当初の背景

船舶の排出ガスに対する窒素酸化物と硫黄酸化物に対する規制と地球温暖化防止の観点から、天然ガスを主成分とするガスエンジンは、CO₂ 排出の削減と硫黄酸化物を排出しないいくために、船舶用ガスエンジンが注目されている。大型船用機関への天然ガス適用における燃焼法の一つに、気体を高圧に圧縮し筒内に直接噴射し拡散燃焼させるガス直接噴射式(GI)が検討されている。ただし、従来の重油燃料と違い、ピストンによる圧縮温度だけでは、ガス燃料は安定した着火ができないために、安定した着火のためにパイロット燃料として、少量の液体燃料(A重油等)を噴射する必要がある。よって、気体燃料中に噴射される液体燃料の着火が気体燃料の燃焼特性に及ぼす影響を確認する必要がある。

2. 研究の目的

液体燃料による噴射量・噴射時期がそれに続く気体燃料の燃焼特性に及ぼす影響を急速圧縮膨張装置を用いて評価することと筒内に直接噴射された気体噴流中の液体燃料噴霧の発達過程・それらの混合気形成・着火特性を解明するために液相と気相を区別して可視化するために、偏光子を用いて互いに直交した方向に振動する直線偏光を持つ2つの光線を用いて、片方はシャドウグラフ法を用いた光学系とし、他は散乱法を用いた光学系として、重ね合わせて、観測対象を通過させた透過光を偏光子を用いて2つの高速度カメラで計測するという液相・気相の同時撮影として新しい可視化法を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 液相と気相の同時計測

本研究では、次に提案する可視化法を用いて、初めにディーゼル噴霧の蒸発・燃焼過程を可視化計測することによって液相と気相の同時可視化計測を検討する。気相と液相の同時可視化計測には、レーザー光源をシート状に形成し燃料噴霧へ入射させその透過率・吸収率より、燃料濃度分布を測定するレーザー吸収散乱法(LAS: Laser Absorption Scattering)がある。しかし、この手法は、濃度分布を定量的に測定する長所があるが異なる2種類の単波長のレーザー光を必要とする。さらに、パルスレーザーであるため、燃料混合気形成過程および着火・燃焼過程を連続的に観察することは困難である。他にもシュリーレン法が従来から、気液相分離の撮影に用いられる。ただし、本研究装置のように大型な急速膨張装置の燃焼過程においては、圧縮膨張による筒内の密度変化に加えて燃焼が生じると集光位置の変化が大きくなり、適用が難しい。よって、本研究では、気相にシャドウグラフ法を適用し、液相の可視化には、後方散乱法を用いる。それぞれの光源の分離には、偏光子を用いる。図1に示す光学系にて検討を行なう。直線偏光である光源

1 (Nd:YAG レーザー)を用いる。次に別のレーザーから、光源1の振動方向に直交した偏光成分になるように波長板によって光源2を調節し、その直後でハーフミラーによって光軸1と光軸2を合成する。観測対象を通過後、その合成光を再びハーフミラーおよび偏光子を用いて、光軸1と光軸2に分離させ、高速度カメラにて撮影を行なう。ただし、第一段階として、シャドウグラフ法と背景散乱法の光学系の合成の確認を異なる波長を用いて行う。使用した波長は、Nd:YAG レーザー(532nm)と Ar⁺レーザー(514nm)を用いた。それぞれの波長に対応する干渉フィルター(半値幅 1nm)を通して、2つの高速度カメラ(Photoron, FASTCAM SA4, 20000fps; Nippon ROPER, REDLAKE HG-100K, 10000fps)にて撮影を行った。また、背景散乱法には、観測対象と同等の散乱板が必要であり、シャドウグラフ法と光軸を合成するには、観測対象より大きいハーフミラーを用いて、観測対象の直前で合成する。

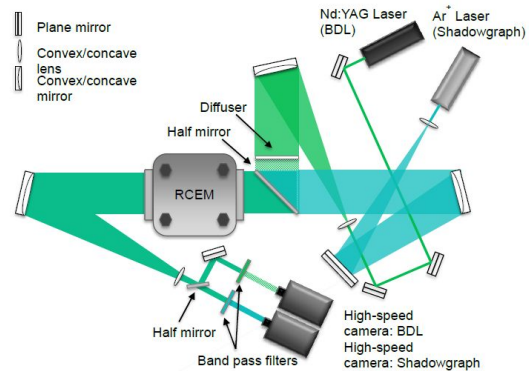


図1 光学系概要図

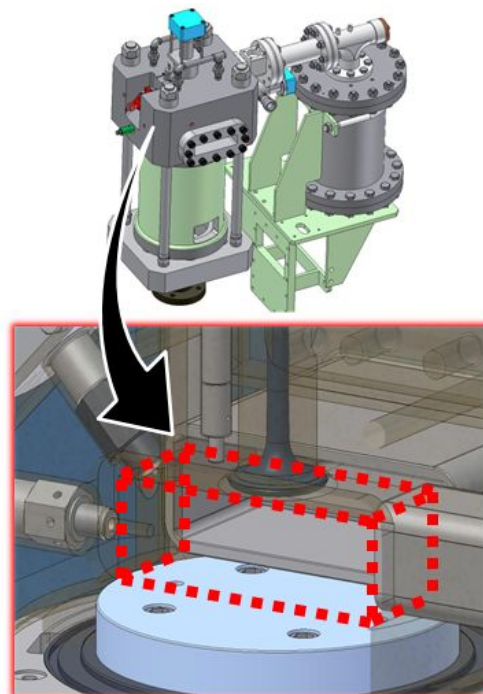


図2 実験装置概要図

(2) 急速圧縮膨張装置

実験装置は、図2に示す急速圧縮膨張装置 (RCEM: Rapid Compression Expansion Machine) を用いた。RCEMの燃焼室は直方体部 (幅200mm, 高さ66mm, 奥行き80mm) と円柱部 (直径240mm 高さ4.1mm) で構成されている。そして直方体の両側に幅200mm、高さ50mmの燃焼観察用窓を設置することで燃焼を可視化し、十分な視野を確保することを可能にしている。このため、燃焼室が改造前と比べて大きくなり圧縮比が9.54と下がっているが、本装置では予熱タンクにて加熱タンクで高温・高圧の空気を充填し、燃焼サイクル時に燃焼室に導入することで圧縮圧・圧縮温度を確保している。また、噴射系は、電磁弁等を電子制御せすることにより、噴射期間・噴射時期を任意に設定できる。また、高圧ガス噴射装置も同様に電子制御しているため、任意に噴射条件を設定できる。基本的な雰囲気条件は、表1に示す。燃焼後の既燃ガスは、排気ガス測定装置 (HORIBA, MEXA-7100) へと通じており、排気分析を行う。

表1 実験条件

Experimental condition

Bore x Stroke	200mm x 260mm
Clearance Volume (upper, lower)	200 x 66 x 80mm ³
	240mm x 5.4mm
Compression ratio	9.54
Engine speed	300rpm
Quartz windows	200 x 50 x 100 mm ³
charging condition at TDC	
Pressure	10 MPa
Temperature	900K

Injection condition

Experiment	GI pilot	Gas	Diesel
Diameter [mm]	0.16	1.2	0.5
Pressure [MPa]	60	30	100
Duration [deg.]	11	23	23

4. 研究成果

(1) 液相と気相の同時計測

図3に本研究で検討したシャドウグラフ法と背景散乱法の同時計測によって、得られたディーゼル噴霧の画像を示す。

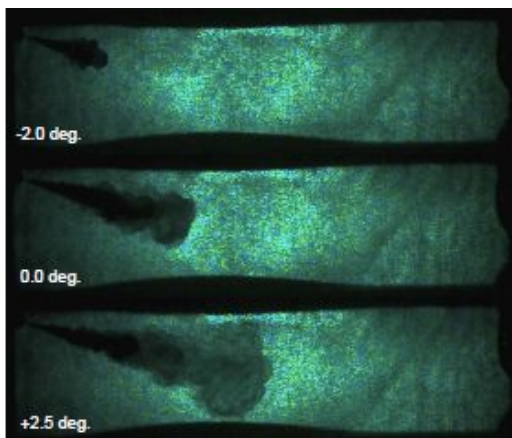


図3(a) シャドウグラフ法

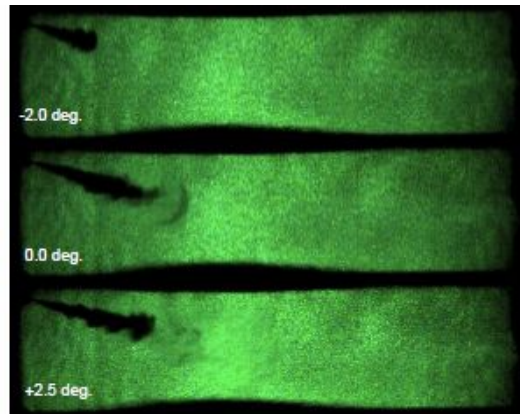


図3(b) 背景散乱法

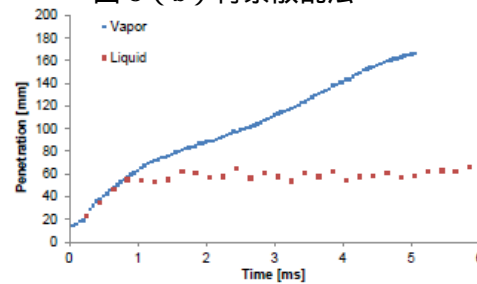


図4 液滴および噴霧到達距離

本条件では、ディーゼル噴霧の発達過程および蒸発過程のみを観測するため、窒素雰囲気場で実験を行った。図4に画像から計測した噴霧の到達距離と液滴の到達距離の時間経過を示す。図3より分かる通り、2つの方法を比較すると、シャドウグラフ法では、噴霧の外形が可視化できている。背景散乱法によって液滴のみが可視化された画像と比べてみると時間とともに噴霧の発達過程がシャドウグラフ法によって確認でき、ある一定距離の間で液滴が蒸発してしまうことが背景散乱法により確認できる。図4と共にこれらの傾向は、ディーゼル噴霧の傾向と一致するため、大型ハーフミラーを用いたシャドウグラフ法と背景散乱法の同時撮影は可能であることが確認できた。次に図5にガス噴射にシャドウグラフ法および背景散乱法の同時撮影を適用し、偏光板を通して、分光した画像を示す。今回は、光軸の途中に左側と右側で偏光方向が90度異なる偏光板通すことにより、一つのカメラで偏光によるシャドウグラフ法と背景散乱法の分光の可能性を検討した。図5の右側が背景散乱法による光源を通し、左側がシャドウグラフ法による光源を通している状態である。本試験は、噴射量が少なく、密度変化が小さいため、噴霧の外形

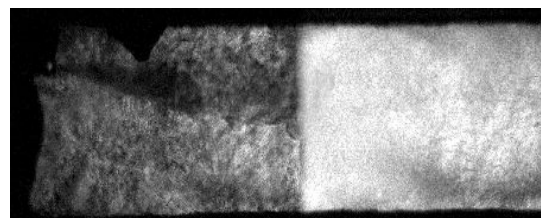


図5 同時計測結果

が分かりにくいですが、噴霧および噴霧周りの空気流動の様子が画像中心を境に変化することが分かる。しかし、本研究で用いた偏光板の消光比が低かったことと、可視化法による必要なレーザーの出力の関係上、明確に分光できなかったため、燃焼実験については、レーザーの波長によって分光し、各々の画像を同時計測した。

(2) ガス筒内直接噴射における着火用液体燃料の噴射中の挙動

図6に燃焼室内にメタンガスを30MPaで噴射し、その噴流を液体燃料およびグロープラグで着火させた燃焼をシャドウグラフ法と背景散乱法の同時撮影した画像を示す。液体燃料には、軽油を用いた。これまでの研究により、軽油のみを本実験と同等の条件で噴射し、背景散乱法により可視化した場合、黒い部分はほぼ同じ場所に輝炎が存在することが分かっている。よって、図6の背景散乱法による黒い部分は、噴流火炎中の液体燃料による輝炎の挙動である。ここには、記載していないが、液体燃料を着火源としている場合、-1degの時点で、噴流は着火し輝炎が発生している。よって、シャドウグラフ法で噴流火炎が可視化されている。この時の背景散乱法の画像には、液体燃料による火炎が噴流火炎の先端を覆うように存在していることが分かる。これは、気体噴流が液体燃料の火炎を先端から巻き込むことはできず、押し出しているため、このような形になると考えられる。また、グロープラグの燃焼を確認してみると、背景散乱法の画像では、噴流着火時点においても黒い部分は、確認されない。このことから、液体燃料中の背景散乱法による画像の黒い部分は、噴流火炎中の液体燃料の可視化ができているといえる。

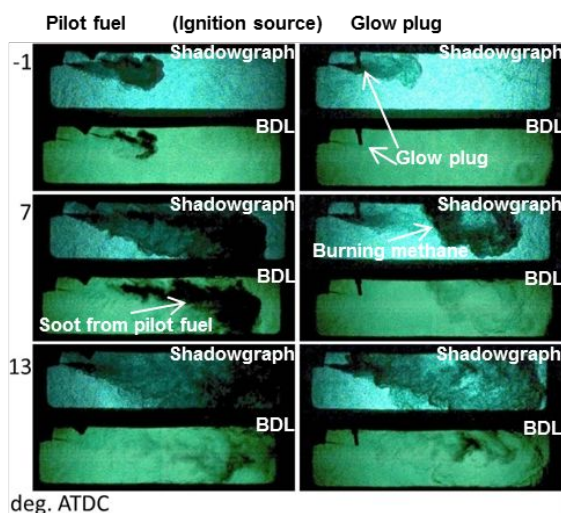


図6 着火方式の比較画像

次に液体燃料の噴射時期がメタンの燃焼に与える影響を確認するために、噴射時期を変更し、熱発生率を計測した例を図7に示す。噴射時期を通常より2deg早めた条件と2deg遅めた条件の3条件で比較を行う。図7の結

果から、噴射時期を早めた場合は、メタン燃焼に与える影響は少ないが、噴射時期が遅くなると、メタンが着火するまでの時間に空気と燃料の混合が促進され、着火後にディーゼルノックの様な急峻な熱発生が生じている。排気ガス測定の結果からも遅い噴射時期の方が、一酸化炭素、未燃炭化水素の値が高くなっている。このことから、液体燃料の噴射時期は、ある適正な時期があり、早期に噴射してもメタン燃焼に与える影響は少ないが、遅くなると急峻な熱発生が生じる。

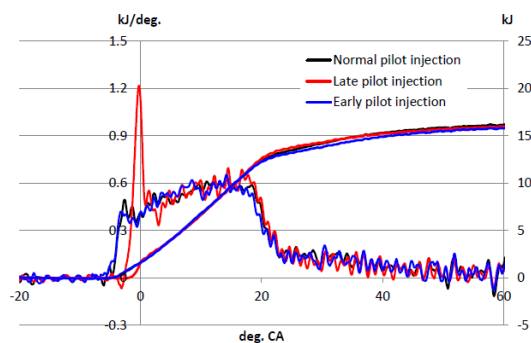


図7 噴射時期の影響

液体燃料の噴射量がメタン燃焼に与える影響を確認するために、噴射量を総発熱量の約3%, 5%, 7%と設定し、熱発生率を計測した例を図8に示す。熱発生率の結果から、噴射量を減少させても、着火後のメタンの燃焼への影響は少ないことが分かる。また、排気ガス測定の結果から、わずかながら、窒素酸化

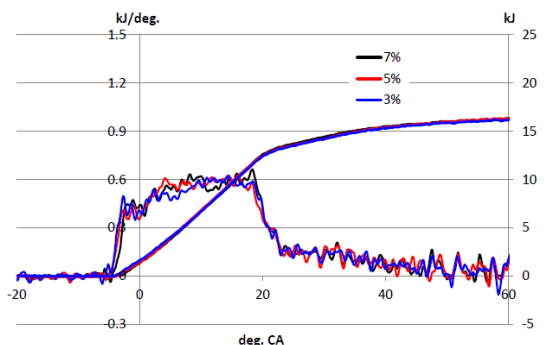


図8 噴射量の影響

物が減少している傾向が確認された。これは、液体燃料の火炎により、局所的ではあるが、温度上昇したことによりサーマル NOxが増加したと考えられる。また、撮影画像からも噴射量が多いほうが液体燃料の火炎面積も大きく、明らかな違いがみられた。

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 3 件)

Koji TAKASAKI, Dino IMHOF, Ryosuke ISHIBASHI, Daisuke TSURU,
Fundamental Study on GI(Natural Gas

High-Pressure Injection) Combustion with Visualization Method,14th the working Process of the internal Combustion Engine, vol.96-1, 96-109,2013.09.査読有

Dino IMHOF, Daisuke TSURU, Koji TAKASAKI, Hiroshi TAJIMA, Dino Imhof,High-Pressure Natural Gas Injection (GI) Marine Engine Research with a Rapid Compression Expansion Machine, Paper NO.12 CIMAC congress,2013, 査読有

Daisuke TSURU, Hisako KATO, Hiroshi TAJIMA, Numerical and Experimental Study of Reduction of NOx on Diesel Combustion by Using Water Injection Systems, ICLASS 2012, 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

Daisuke TSURU, Dino Imhof, Ryosuke Ishibashi, Hiroshi Tajima,PCCI Combustion as NOx Reduction Measure for Marine Engines by Spray Distribution Control and LCO Fuel,Proceedings of THIESEL 2012,2012.09.12

青柳 享秀, 鶴 大輔, 田島 博士,エマルション燃料と EGR の導入が船用ディーゼル機関の噴霧燃焼に及ぼす影響,第 23 回内燃機関シンポジウム,2012.11.01.

田島 博士, 鶴 大輔, 熊谷 幸司, 岡崎 航介,背景散乱光と平行透過光の同時計測による低NOx 燃焼時のディーゼル噴霧の可視化計測,可視化情報学会全国講演会 2012,2012.10.04.

田島 博士, 鶴 大輔, 青柳 享秀, 岡崎 航介,EGR 模擬条件下における水エマルションの NOx 低減と燃焼に及ぼす影響,第 82 回マリンエンジニアリング学術講演会,2012.09.20.

〔図書〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

鶴 大輔 (TSURU,Daisuke)

九州大学・大学院総合理工学研究院・助教

研究者番号：1 0 6 6 1 4 6 2 0

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし