

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420877

研究課題名(和文) 高圧雰囲気場における天然ガス-空気希薄予混合場での未燃排ガス低減手法の提案

研究課題名(英文) Study on unburned methane reduction technique of lean mixture under high ambient pressure conditions

研究代表者

高木 正英 (Takagi, Masahide)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50371092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：天然ガスを燃料としたエンジンから排出される未燃のメタンは、二酸化炭素に比べて温暖化係数が高く、排出量の削減が求められている。この未燃メタン排出低減手法として、未燃部からの自着火誘発による急速燃焼と、高圧雰囲気化による消炎距離の短縮化を狙った。その結果、燃焼(圧力上昇)に影響を及ぼさない程度の自着火では、未燃メタン量を低減することはできなかったが、燃焼開始時の雰囲気圧力を2.0MPaから4.5MPaに増加させることによって、約25%のメタン濃度の低減が実現できた。

研究成果の概要(英文)：It is required to reduce unburnt methane from natural gas engines. Methane has a high global warming potential and the impact of methane on global warming is 20 times that of carbon dioxide. The rapid combustion by auto-ignition resulting from unburnt region and reduction of the quenching distance by the high ambient pressure have been proposed as a methane reduction technique. As a result, auto-ignition which do not affect the combustion (pressure rise) was not able to reduce the unburnt methane. Reduction of 25% methane concentration could be achieved by an increase from 2.0 to 4.5MPa of ambient pressure at ignition timing.

研究分野：内燃機関工学

キーワード：ガス燃焼 メタンスリップ低減 高圧化 自着火 急速燃焼

1. 研究開始当初の背景

希薄予混合方式の天然ガスエンジンは A, C 重油を用いる船用ディーゼルエンジンに比べて CO₂、窒素酸化物(NO_x)排出量が少ないという利点があり、地球温暖化問題、船舶における NO_x 規制に関する対策の一つとして、近年船舶への適用が考えられている。しかし、予混合気の希薄化によって未燃焼の燃料が多く排出されることが問題となっている。これは天然ガスの主成分がメタンであることから「メタンスリップ」と呼ばれ、メタンの温暖化係数の高さ(CO₂の 21 倍)からガスエンジンのメリットを縮小させてしまう可能性がある。

メタンスリップは、吸排気行程での燃料(空気との混合気)の吹き抜けを除けばシリンダ内の現象として、(1)燃焼室内の混合気の希薄化による部分的な不完全燃焼、(2)燃焼室壁面近傍、トップランド、トップリング周りの隙間の消炎(Quenching)による未燃焼に分けることができる。これまで、未燃焼の燃料排出に関する研究は、ガソリンエンジンを用いた Heywood らの様々な要因分析を行ったものがあり、燃料に関するフローチャートの形で結果の一例が示されている。しかしながら類似の研究が少なく、ガソリンからガスへの燃料種の変更や、量論燃焼と希薄燃焼の違いなど、ガソリンエンジンの結果をガスエンジンに適用できるかどうかは確認されていない。このようなエンジンによる応用研究ではボア・ストロークや燃焼室形状等のエンジン固有の条件を排除できないため、現象を抽出した基礎研究も行われている。しかし、雰囲気温度・圧力が実際のエンジン条件に比して低い場合、基礎研究による結果がエンジンによる応用研究の結果に結びつかず、基礎、応用研究の両者の関係が関連付けられていない。そのためメタンの排出に関してガスエンジンの設計は、理論的な観点よりも、これまでの各社のノウハウと実際のエンジン実験による経験的観点に重点を置いた対応が行われているのが現状である。

2. 研究の目的

今後の燃費、NO_x 排出量の関係からエンジンの開発トレンドである高圧雰囲気(高過給化)でのメタンスリップ低減手法として、未燃混合気側での自着火(SACI; Spark Assisted Compression Ignition)を用いた「燃焼促進」による低減手法を提案し、この燃焼促進による効果を調べる。SACI は点火プラグでの点火によって生じた燃焼によってシリンダ内温度と圧力を上げて未燃予混合気域での圧縮着火を誘発する燃焼方式である。また、雰囲気圧力の増加によるメタンスリップ低減効果、及び燃焼室壁面表面積との関係についても併せて検証する。

3. 研究の方法

実験には、図 1 に示す急速圧縮装置を用い

た。この装置は、シリンダ内に密閉された気体(メタン - 空気予混合気)を急速に圧縮し、エンジン内の高温高压条件を再現する。設置しているピストン直径は 100mm、ストロークは 120mm である。ピストンに取り付けられている燃焼室は、図 2 に示す火炎伝播方向長さ L を 60, 80, 100mm に変更した高さ、奥行き 30mm の直方体とした。予混合気の着火には点火プラグを用いた。ガス燃料/空気の混合は、メタンと空気が所定の濃度で極力濃度ムラがないように均質にすることが重要である。ここでは、メタン及び乾燥空気ボンベからガス混合器に両ガスを導入することで均質な予混合気を作製し、この予混合気をバッファタンクに 1.0MPa 以下の圧力で溜めておくことで急速圧縮装置のシリンダ内への過給にも対応できるようにした。なお、メタンと空気の混合割合はガス混合器によって設定できる。その後、圧力、温度の調整を行い、予混合気は燃焼室内に充填される。本実験ではメタン - 空気当量比は 0.7、初期圧力は 0.15~0.3MPa、初期温度及び壁温は 90 とした。燃焼実験中、筒内圧力、ピストン移動量の計測を行っている。なお、燃焼中はピストンを停止させることで、定容条件での試験を実施した。燃焼後の排気については、O₂、NO_x、CO、THC(Total hydrocarbon)を計測している。O₂、NO_x、CO はサンプリングバックに収集し、除じん、除湿のための前処理装置を通した後、THC は前処理装置を通さずに水分を含んだ湿り状態のまま直接計測器に導入、計測を行っている。

燃焼室内の火炎伝播及び自着火、燃焼の可視化撮影のための光学系には、シャドーグラ

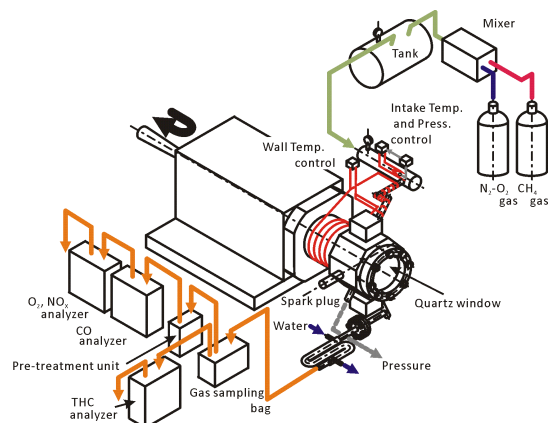


図 1 実験装置 (急速圧縮装置)

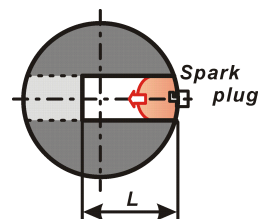
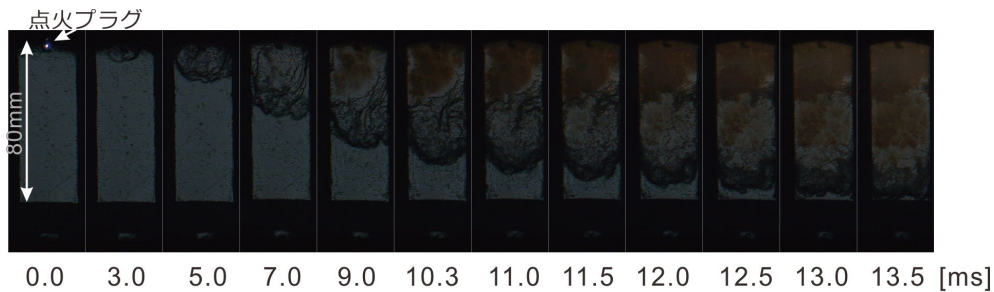
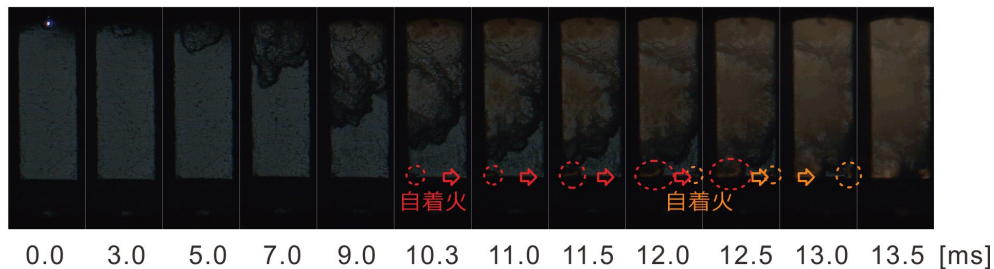


図 2 実験装置 (燃焼室形状)



(a) $P_{ini}=0.15$ [MPa], $L=80$ [mm]



(b) $P_{ini}=0.20$ [MPa], $L=80$ [mm]

図3 未燃混合気の圧縮着火の有無における火炎進展状況の可視化

フ光学系を用いている。シリンダヘッド部には直径 120mm ,厚さ 70mm の円柱形の石英ガラスを、ピストンヘッドにはステンレスミラーを設置し、反射型の光学系としている。撮影には高速度ビデオカメラを、光源にはキセノンランプを使用している。

4. 研究成果

急速圧縮装置における燃焼試験において、燃焼室長さ L が短い 60, 80mm の時には、初期圧力を増加させていくと点火前、もしくは点火後に予混合気からの自着火を生じる。つまり、同一燃焼室形状、同一温度においても、圧力の上昇によって予混合気の自着火の発生状況が変化することが確認できた。また、この自着火が生じる圧力よりも低い圧力条件において、想定していた伝播火炎による未燃混合気圧縮から生じる未燃部の自着火を観察することができた。図3に燃焼室長さを $L=80$ mm とした時の通常の火炎伝播のみによって燃焼室内の燃料を燃焼させた初期圧力 0.15MPa (図内(a)), 未燃混合気の自着火を生じた 0.2MPa (図内(b))の可視化結果を示す。時間は、点火プラグの電極間での放電を観察することができた時を燃焼開始時として 0 にしている。通常の火炎伝播が観察された初期圧力 0.15MPa の場合には、放電が発生してからある一定時間を経過した後、反応が進展していく。その時、壁面側の反応進展は中央部分よりも遅くなっていることがわかる。点火プラグと対向する壁面に反応帯が近づいていくと、未燃部の圧力増加などの影響によって、反応進展の速度が減少する傾向にあることがわかる。それに対して未燃部での自着火が生じる初期圧力 0.2MPa の時は、9.0ms 程度

までは初期圧力 0.15MPa の場合に比べて反応の進展が遅いことがわかる。しかし、10.3ms になると対向壁面付近から自着火が生じていることが観察できる。その後反応進展に従って、自着火した反応部も反応が進行し、12.0ms になると、新たに未燃部から自着火を生じる。そのため、可視化画像からは、両者の火炎伝播の時間はほとんど変わっていないように見える。なお、この時の圧力履歴からは自着火の判別はできなかった。

図4に燃焼室長さ $L=100$ mm の時の初期圧力による圧力上昇の変化について示す。縦軸に示した圧力は、初期圧力の違いを排除するために、放電発生時(燃焼開始時)の雰囲気圧力 P_a との差になっている。初期圧力が高くなると、圧力上昇率が大きくなり、燃焼終了(圧力増加終了時)も早くなる。また、初期圧力の増加は燃焼室内燃料量の増加につながるため、最大圧力も大きくなる。

図5に雰囲気初期圧力、燃焼室長さを変更した時の NO_x 、メタン排出濃度を示す。初期圧力が増加していくと、メタン濃度が減少し

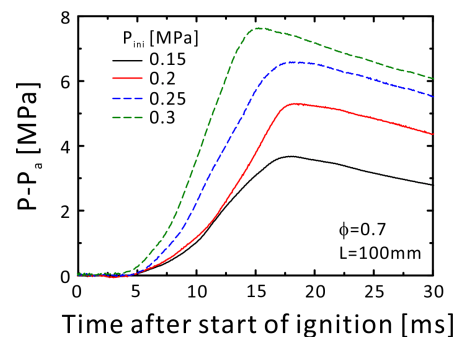


図4 初期圧力と圧力上昇の変化

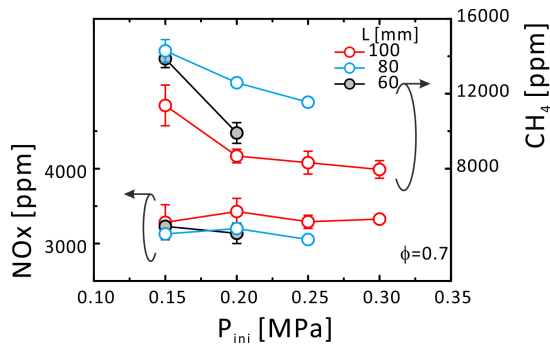


図 5 雰囲気圧力，燃焼室長さ変更における排気特性変化

ていくことがわかる。また，燃焼室長さ，火炎進展距離が長くなってもメタン濃度が減少していく。しかし，未燃部の自着火によるメタン低減は見られなかった。これは，圧力履歴で確認できないような火炎伝播に比べて大きくない自着火反応であったことに起因すると考えられる。高圧化によるメタン濃度の低減に関しては，初期圧力が 0.15 から 0.3MPa (燃焼開始時の圧力は 2.0 から 4.5MPa) になるとメタン濃度を約 25% 低減させることができる。それに対して，NO_x は初期圧力，燃焼室長さにほとんど依存していない。

以上の結果を以下のようにまとめる。

- ・高圧雰囲気化によって，メタン - 予混合気の未燃混合気から自着火が生じる。但し，圧力履歴に影響が現れない程度の場合，排気への効果もほとんど得られない。
- ・初期圧力が増加すると，燃焼による圧力上昇が大きくなる傾向がある。
- ・雰囲気の高圧化によってメタンスリップは減少する。燃焼開始時の圧力を 2.0 から MPa にすると，メタンは約 25% 低減することができる。それに対して NO_x はほとんど変化しない。
- ・火炎進展距離が長くなると，メタン量は減少している。

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 0 件)

[学会発表](計 0 件)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 正英 (TAKAGI, Masahide)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局等・研究員
 研究者番号： 50371092

(2) 研究分担者

川内 智詞 (KAWAUCHI, Satoshi)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局等・研究員
 研究者番号： 20549993

今井 康雄 (IMAI, Yasuo)
 国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他の部局等・研究員
 研究者番号： 40426218