

急速圧縮機を用いたプラズマアシスト点火および燃焼特性

日大生産工(院) ○平川 健人 日大生産工(院) 篠原 祐太 日大生産工 氏家 康成
日大生産工 野村 浩司 東京大 工 津江 光洋 東京大 工 中谷 辰爾 トヨタ自動車(株) 芳賀 宏行

1. はじめに

ディーゼル機関において、圧縮比が高いほど理論熱効率が向上することは知られているが、高圧縮比化によって摩擦の増大や圧力上昇に対する機械的強度が必要となり、コストや重量、振動の増大という欠点がある。また、燃焼温度が高く NOx の発生も多くなる。そのため近年では、その改善策として低圧縮比化が注目を浴びている。

低圧縮比化により理論効率は低下するが、機械効率を大きく改善でき、コスト、重量、振動を低減できる。また、燃焼温度が下がり、NOx の発生を低減できる。

しかし、低圧縮比化に伴い自己着火しにくくなる欠点がある。そこで、ディーゼルエンジンの低圧縮化を実現させるための新たな技術を求められている¹⁾。

本研究では、確実な点火²⁾と NOx、煤の低減³⁾を実現させる、プラズマアシストディーゼルエンジンに着目し、その点火および燃焼特性を調査するためのテストベンチを製作した。

現段階ではディーゼルエンジンとプラズマ発生装置は分けて実験を行っており、ここでは主に、急速圧縮機を用いたプラズマアシスト点火による燃焼特性の結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本実験装置は Fig.1 に示した急速圧縮装置と Fig.2 で示したプラズマ発生装置から構成される。また、マイクロ波プラズマを発生させるアンテナを Fig.3 に示す。

急速圧縮本体は燃焼容器、ピストン作動停止機構、オイルドライバ、点火装置、計測装

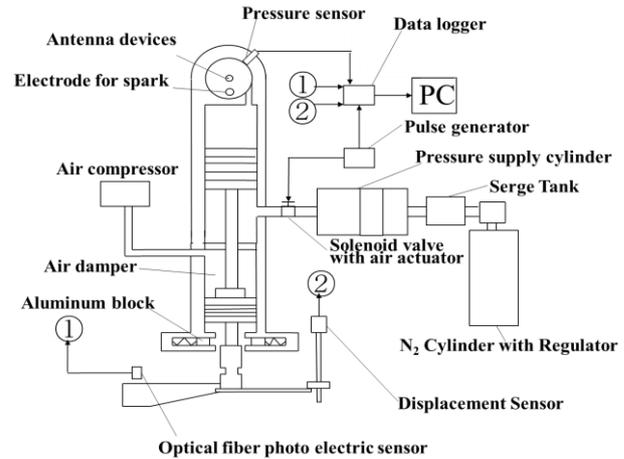


Fig.1 Outline of rapid compression machine system

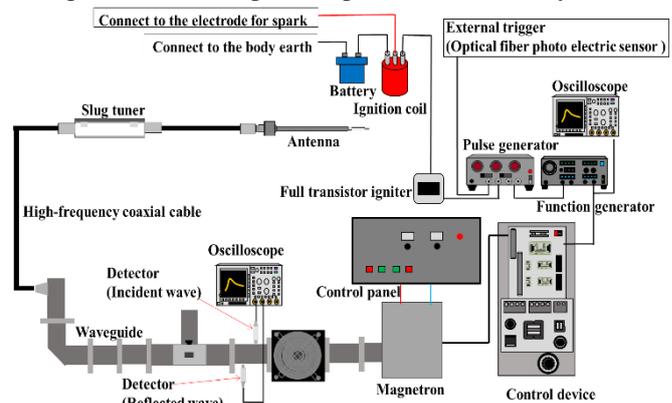


Fig.2 Plasma generator

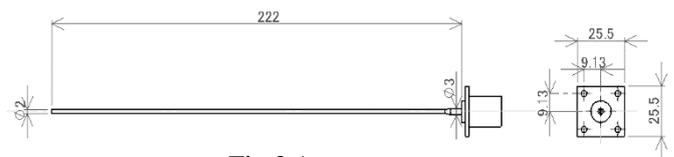


Fig.3 Antenna

置系から構成される。シリンダ内径は 60mm、ピストン行程は 136.9mm、燃焼容器は内径 50mm、幅 14mm、の円筒形であり圧縮比は 14 である。オイルドライバは窒素ポンペ、サージタンク、作動流体加圧ピストンシリンダ、および各部品を接続する配管で構成される。配管中にはエアアクチュエータ付ボールバルブを配置している。窒素ポンペから供給された高圧窒素ガスが作動流体加圧ピストンシリンダ内のフリー

ピストンを介し作動流体を加圧する。作動流体には、低粘性と耐食性を考慮し、灯油を使用している。エアコンプレッサから圧縮空気をソレノイドバルブに介してエアアクチュエータ付ボールバルブに送る。パルスジェネレータにより電気信号を与えることによりソレノイドバルブが開き、エアアクチュエータが作動してボールバルブが開く、これにより灯油が急速圧縮機のピストン背後部を加圧し圧縮が行われる。点火系はトリガスパークアンテナ、点火回路およびファイバ光電センサから構成される。計測装置系は、磁歪式リニア変位センサ、圧力センサ、直流増幅器およびデータロガーで構成される。

マイクロ波導入装置系は、2.45GHz マイクロ波発生装置、導波管、スラグチューナ、アンテナより構成される。マグネトロンによってマイクロ波を発生させ導波管、同軸ケーブルを用いて伝送し、スラグチューナを介してインピーダンス整合を行いアンテナからマイクロ波を放射する。アンテナの芯線はステンレス鋼(SUS304)を使用した。マイクロ波の発生タイミングは急速圧縮機の点火タイミングと同期した電気パルスを用い、パルスジェネレータ、ファンクションジェネレータを介して決定する。アンテナは実機のシリンダーヘッドの一部を模擬した燃焼室容器に挿入されており、トリガ装置には、トランジスタ式点火回路を用いた。

2.2 実験方法

本実験では高圧縮比条件下の火花放電に対しマイクロ波の放射を行い点火特性と燃焼特性について調査した。まず、ダミーロードを用い、マイクロ波発生装置の導波管に取り付けたサンケン製 SDT-50S の検波器を用いてマイクロ波の入射波、反射波を測定し、反射比が最小となる条件をスラグチューナより整合した。(Fig.4) そして、高圧条件下(筒内圧 3MPa 程度)でのマイクロ波プラズマの生成の有無を判断するために放電実験を行った。燃焼室内の放電の様子を石

英ガラスよりビデオカメラを用いて撮影した。次に点火時期 20deg 相当、圧縮比 14、当量比は 1.0 の急速圧縮機で実験を行った。燃料はオクタン価 90 に調整した正ヘプタンとイソオクタンの混合燃料を用いた。圧縮比 14 となるピストンの下死点に調整した。当量比 1.0 の混合燃料をシリンダ内に滴下して一定時間おき、燃料を気化させ燃焼室に予混合気を生成する。その後、圧縮、点火を行い、同時にマイクロ波の放射を行うことで、マイクロ波プラズマを発生させた。この時の圧力履歴、ピストン変位および点火時期の記録を行い、マイクロ波放射を行った場合とスパーク点火のみの場合の燃焼特性を比較した。トリガスパークは急速圧縮機の点火タイミングと同期させ、マイクロ波は 1~20kHz で印加し、放射時間を 50msec で設定した。

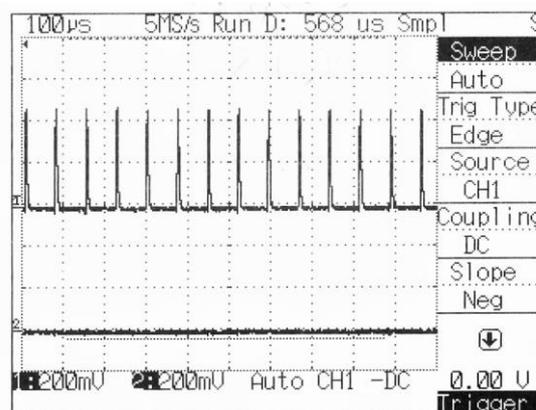


Fig.4 Microwave waveform (Dummy load)

3. 実験結果および考察

3.1 マイクロ波プラズマの生成

高圧条件下(筒内圧 30MPa 程度)でのマイクロ波プラズマの生成の有無を判断するために放電実験を行った。燃焼室内の放電の様子を石英ガラスよりビデオカメラを用いて撮影した。トリガスパークのみの場合と比較してマイクロ波を印加させた場合のスパークの光強度が向上したことを確認した。(Fig.5) また、同時に検波器

で感知したマイクロ波の入射波、反射波の出力の状態を Fig.6 に示す. 大気圧条件下でのマイクロ波の入射波、反射波を Fig.6 (a) に示し、高圧条件下(2MPa 程度)でのマイクロ波の入射波、反射波を Fig.6 (b) に示す. この結果より火花放電によって生じたラジカルにマイクロ波が吸収されマイクロ波プラズマを生成されたと判断した.また、高圧条件下においての入射波、反射波の出力の状態は、大気圧と比較すると差が小さくなるが、反射波が吸収されているのが確認できるので実機を用いた場合でも同様の効果を得られると判断できる.そして、放電実験ではマイクロ波の周波数を 1~20kHz と変移される場合、最も光強度が向上し最大の入射波と反射波の差が生じる周波数帯を調べた.そしてプラズマの発生条件の一つには周波数依存性が存在し、15kHz 付近であることが判明した.この結果より燃焼実験ではマイクロ波の周波数を 15kHz で一定とした.

3.2 点火特性および燃焼特性への影響

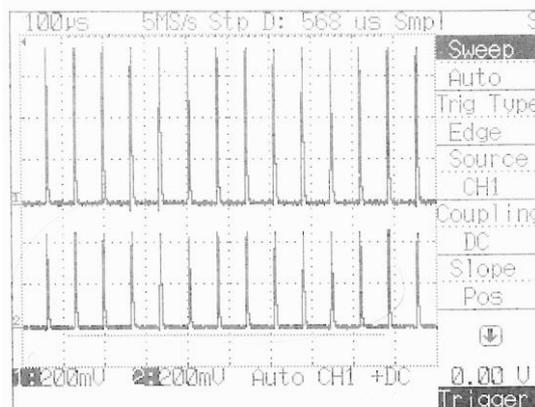
Fig.7 に高圧縮比条件下でトリガスパークのみの場合とマイクロ波を印加させた場合での、燃焼実験の圧力履歴を示した. Fig.7 では 0 sec を点火時期としている.この圧力履歴より、マイクロ波を印加させたスパークを用いた場合には、トリガスパークのみの場合と比較して燃焼圧の立ち上がりが早期化していることが確認できた.しかし、燃焼期間が増大し最大燃焼圧力が低下し、燃焼圧力が低下した後に圧力履歴が平行する傾向がみられた.これはまずマイクロ波が火花放電で生じたラジカルに吸収されプラズマ化することにより点火エネルギーが増大されて点火遅れが短縮されたと考えられる.また、点火後にもマイクロ波が放射されているので、マイクロ波が燃焼圧の立ち上がりから最大燃焼圧までの期間の間で何らかの影響を及ぼし燃焼を緩やかにしていると考えられる.そして、最大燃焼圧の後に一度燃焼圧が平行するのはマイ



Fig.5 Plasma generation



(a) Microwave waveform (Atmospheric Pressure)



(b) Microwave waveform (High Pressure)

Fig.6 Microwave waveform

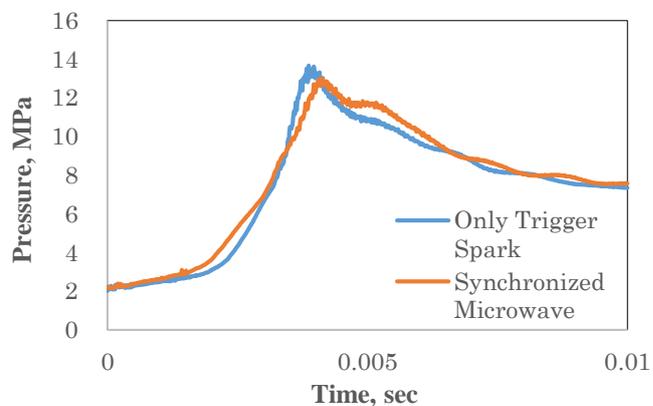


Fig.7 Pressure history

クロ波の放射により燃焼が継続されていたと考えられる。

3.3 アンテナ芯線の材質による特性変化

現在使用しているアンテナの芯線の材質をステンレス鋼から抵抗値の小さい純ニッケルのものと交換し、高圧条件下でのスパークの光強度、マイクロ波の入射波、反射波の出力の状態を比較するため放電実験を行った。トリガスパークのみの場合と比較してマイクロ波を印加させた場合のスパークの光強度がさらに向上し、全体的に光強度が向上したことを確認した。(Fig.8) また、同時に検波器で感知したマイクロ波の入射波、反射波の出力の状態を Fig.9 に示す。大気圧条件下でのマイクロ波の入射波、反射波を Fig.9 (a) に示し、高圧条件下(2MPa 程度)でのマイクロ波の入射波、反射波を Fig.9 (b) に示す。この結果より、より抵抗値の小さい材質を芯線に使用することでより効率的にマイクロ波プラズマを発生できることがわかった。

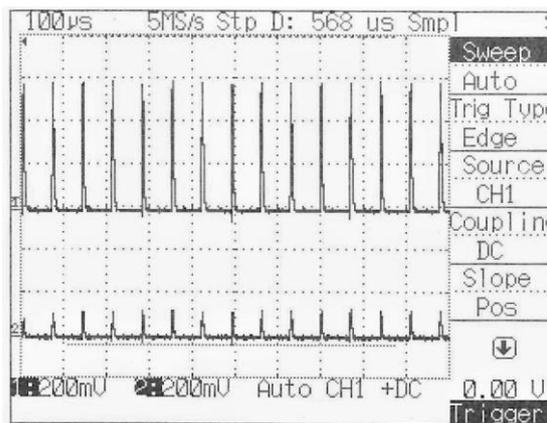
4. 結言

急速圧縮機を用いて高圧縮比条件下の火花放電に対してマイクロ波の放射を行い点火特性と燃焼特性について調査した結果、以下の結論を得た。

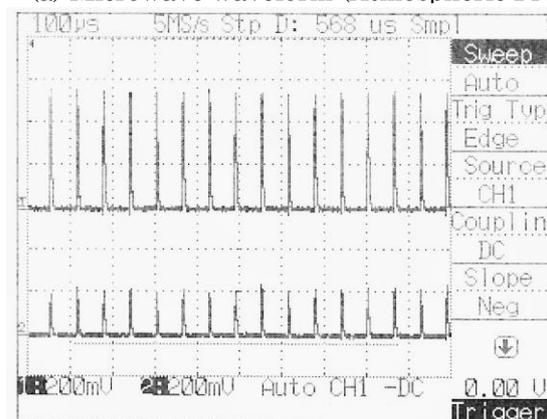
- (1) 実機相当の点火時期の筒内圧力 (2MPa 程度) の高圧条件下でマイクロ波を火花放電に印加するとマイクロ波プラズマの生成が確認できた。
- (2) トリガスパークのみの場合とマイクロ波を印加させたマイクロ波プラズマでの圧力履歴を比較すると、マイクロ波プラズマを使用することにより点火遅れを縮小することができ、燃焼時間が長くなることがわかった。
- (3) アンテナ芯線の抵抗値を下げることによってより強力なマイクロ波プラズマを生成することが可能である。



Fig.8 Plasma generation



(a) Microwave waveform (Atmospheric Pressure)



(b) Microwave waveform (High Pressure)

Fig.6 Microwave waveform

参考文献

1. ディーゼル燃料噴射研究会, 新ディーゼル燃料噴射, pp09-10 (1997)
2. 佐藤清太郎, 中谷辰爾, 津江光洋, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集 pp.140-141(2013)
3. 服部仁樹, 安里勝雄, 宮坂武志, 坂本昌寛, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, pp295-296(2010)