

マイクロ波プラズマが点火・燃焼特性に及ぼす影響

日大生産工(院) ○篠原 祐太

日大生産工 野村 浩司 東京大 工 中谷 辰爾 東京大 工 津江 光洋 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化、大気汚染などといった環境問題が発生し、その対策には内燃機関の高効率化および環境負荷低減が急務となっている。ディーゼルエンジンは、その優れた燃料経済性から、農・建産機はもとより大・中・小型トラック、バス、船舶に搭載され、更にRV 車および乗用車用としての活用範囲が大幅に広がって来ている。しかし、社会環境との調和が強く叫ばれている今日、ディーゼルエンジンにとって克服すべき課題は多い。強化されて行く排出ガスや騒音規制をクリアするとともに、燃料経済性の更なる向上、運転性、振動、騒音、始動性、コストなどの改善が強く望まれている。

ディーゼルエンジンにおいて、圧縮比が高いほど理論熱効率が向上することはよく知られているが、高圧縮比化により摩擦の増大や圧力上昇に対する機械的強度が必要となる。そのため、コストや重量の増大、さらには振動の増大という欠点がある。また、燃焼温度が高く、NO_xの発生が多い。そのため近年では、従来よりも圧縮比は低い方が良いと考えられている。低圧縮比化により理論熱効率は下がるが、機械効率が大きく向上し、コスト、重量、振動を低減できる。また、燃焼温度が下がりNO_xの発生を抑制できる。しかし、低圧縮比化によって自己着火しにくくなる問題が発生する。そこで現在、ディーゼルエンジンの低圧縮比化を実現させるための新たな技術が求められている。

本研究では確実な点火と煤、NO_xの低減、燃焼の促進を実現する(1)(2)(3)マイクロ波プラズマ点火に着目した。ディーゼル機関に適用する前段階として、急速圧縮機を使用し予混合気の実験を行った。実機相当の圧縮終わりの筒内圧力下においてマイクロ波プラズマの発生条件と点火・燃焼特性を調べた。

2.1 実験装置

本実験で用いた実験装置を Fig.1 に示す。実験装置は、急速圧縮機、オイルドライバ、点火装

置系、計測装置系、マイクロ波導入装置系より構成される。急速圧縮機本体は燃焼容器、ピストン減速・停止機構から構成される。シリンダ内径は 60mm、ピストン行程 136.9mm、燃焼容器は内径 50 mm、幅 14 mm の円筒形である。

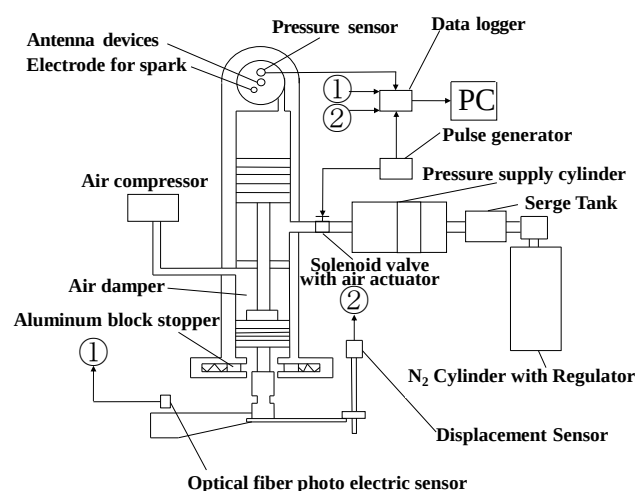


Fig.1 Outline of rapid compression machine system

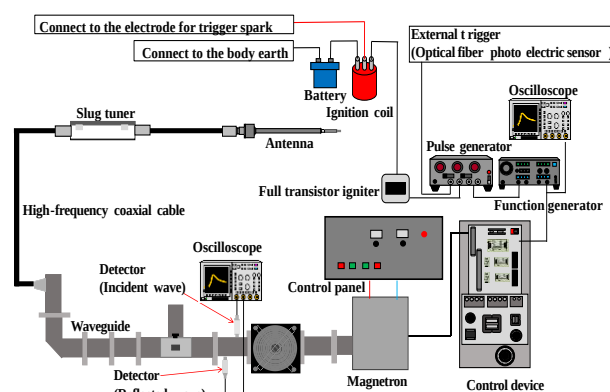


Fig.2 Microwave generator

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きボールバルブを設置している。窒素ポンベ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。低粘性と耐食性を考慮し、作動流体には灯油を使用している。エアコンプレッサから圧縮空気を、ソレノイドバルブを介してエアアクチュエータ付きボールバルブに送る。パルスジェネレータからのトリガー信号で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。点火系はトリガースパーク電極、マイクロ波放射用アンテナ、点火回路およびファイバ光電センサから構成されている。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。

Fig.2 に示すマイクロ波導入装置系は、マイクロ波発生装置、導波管、スラグチューナー、アンテナより構成されている。マグネトロンは作動周波数 $2.45\text{GHz} \pm 50\text{MHz}$ 、マイクロ波出力 $50 \sim 500\text{W}$ である。マグネトロンによってマイクロ波を生成させ導波管、同軸ケーブルを用いて伝送し、アンテナからマイクロ波を放射する。あらかじめスラグチューナーを用いてインピーダンスの整合をとる。また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と反射波の出力を測定した。Fig.3 に実機のシリンダーヘッドの一部を模擬した燃焼容器 (Dummy Head) に挿入されているアンテナとトリガースパーク用電極の断面図を示す。トリガースパーク用電極とアンテナとの間隙においてスパークを発生させ、マイクロ波を印加させることによりマイクロ波プラズマを発生させる。トリガースパーク発生装置には、トランジスタ式点火回路を用いている。

2.2 実験方法

本実験では、大気圧条件および高圧条件で放電実験を行い、マイクロ波プラズマの生成の有無と発生条件を調べた後、点火時期 BTDC 20deg 相当、圧縮比 14 で燃焼実験を行った。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。当量比を希薄側に設定した混合燃料をシリンダ内に滴下して一定時間

おき、燃焼室に予混合気を生成する。その後、圧縮動作に入り、所定のタイミングでトリガースパークを与えてマイクロ波を放射した。このときの圧力履歴、ピストン変位および点火時期を記録し、マイクロ波放射を行った場合とトリガースパークのみの場合を比較した。トリガースパークは 20 Hz (エンジンの 1200 rpm に相当) の周期でかけ、マイクロ波は 1~20 kHz で同期させた。

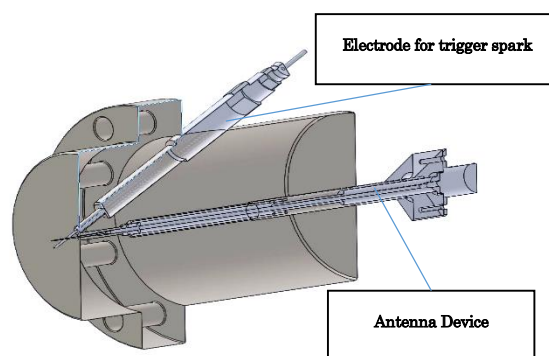
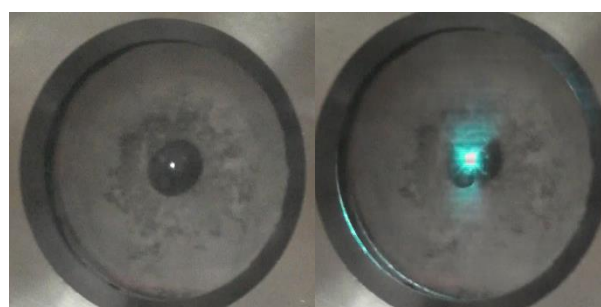


Fig.3 Dummy Head



Only Trigger Spark

Synchronized Microwave

Fig.4 Plasma generation
(Atmospheric pressure condition)

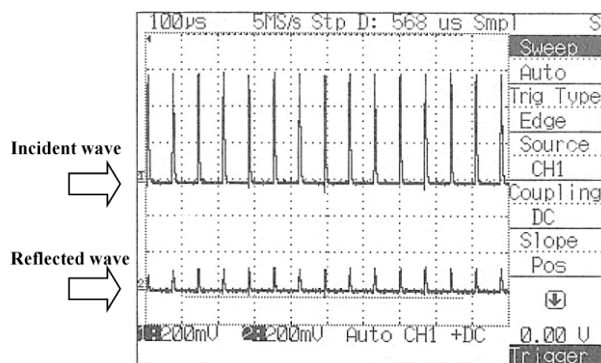


Fig.5 Microwave waveform
(Atmospheric pressure condition)

3. 実験結果および考察

3.1 マイクロ波プラズマの生成

マイクロ波プラズマの生成の有無を判断するために大気圧条件及び高圧条件（筒内圧 3MPa 程度）で放電実験を行った。燃焼室内の放電の様子を石英ガラス窓よりビデオカメラを用いて撮影した。

大気圧条件における放電実験では、トリガースパークのみの場合と比較してマイクロ波を同期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.4）また、同時に検波器で検知したマイクロ波の入射波、反射波の出力に差が生じたことを確認した。（Fig.5）この結果より燃焼室内にマイクロ波プラズマが生成されたと判断した。

高圧条件における放電実験では、トリガースパークのみの場合と比較してマイクロ波を同期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.6）また、同時に検波器で検知したマイクロ波の入射波、反射波の出力に差が生じたことを確認した。（Fig.7）この結果より大気圧条件下と同様に燃焼室内にマイクロ波プラズマが生成されたと判断した。また、高圧条件においては大気圧条件と比較してマイクロ波を同期させた場合のスパークの光強度が大きく向上した。

また、放電実験ではマイクロ波の周波数を 1~20 kHz と変化させた場合、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。その結果、プラズマの発生条件の一つには周波数依存性が存在し大気圧条件、高圧条件において、ともに 15kHz 付近で光強度が最大となることが分かった。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.8 に当量比 0.85 における高圧条件下でトリガー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す。圧力履歴においては 0 sec を点火時期としている。圧力履歴より、マイクロ波を印加した場合とトリガースパークのみの場合と比較し、燃焼圧力の立ち上がりは、初期は同様の立ち上がりであった。しかし、その後はマイクロ波を印加した場合の方が燃焼圧の立ち上がりは急速化された。この結果、燃焼時間が短縮され、最大燃焼圧力が増大する傾向がみられた。

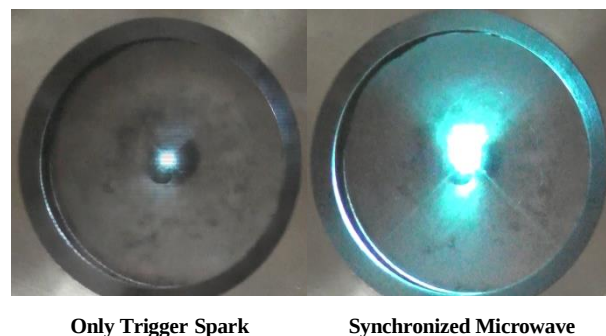


Fig.6 Plasma generation
(High-pressure condition)

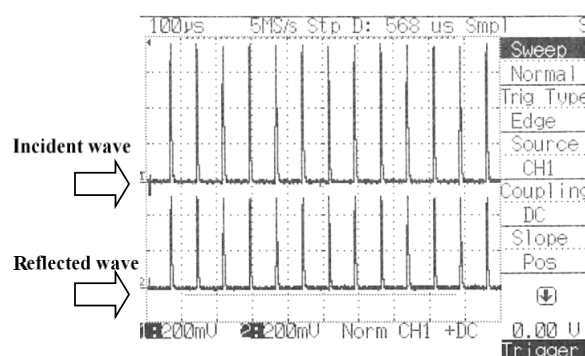


Fig.7 Microwave waveform
(High-pressure condition)

Fig.9 に当量比 0.75 におけるトリガースパークのみの場合とマイクロ波を印加した場合での、燃焼実験の圧力履歴を示す。トリガー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において燃焼圧の立ち上がりは早期化し、最大燃焼圧が高くなる傾向がみられた。希薄燃焼においてマイクロ波を印加することにより燃焼が促進され燃焼室壁面近傍における熱損失が低減された結果、最大燃焼圧が向上したものと考えられる。

以上の結果、希薄混合気の燃焼促進にマイクロ波プラズマの印加が大きく寄与することが分かり、ディーゼルエンジンへの適用にも有益なことが期待される。

当量比を 1.00 から 0.60 まで変化させ同様の実験を行い、マイクロ波を印加した場合とトリガースパークのみの場合、それぞれの各当量比の最大燃焼圧力をまとめた結果を Fig.10 に示し、Fig.11 に各当量比の燃焼時間をまとめた結果を示す。ここでの燃焼時間は点火時期から最大燃焼圧力に達するまでに経過した時間と定義する。

Fig.10 及び Fig.11 より，希薄燃焼になるほど燃焼の促進が顕著になり，最大燃焼圧力は上昇し，燃焼時間は短縮される傾向がみられた．また，マイクロ波を印加した場合，トリガースパークのみの場合では点火できなかった当量比 0.65 と 0.60 の希薄域での点火を確認でき，希薄域の拡大が可能になった．これらはマイクロ波プラズマが燃焼室内に発生したことにより燃焼反応が活性化され，点火時の火炎核成長が促進されたからだと考えられる．

4. 結言

急速圧縮機を用いて高圧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．

- (1) 実機相当の圧縮終圧（3MPa程度）の高圧力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) マイクロ波を用いたプラズマアシスト点火は，燃焼の立ち上がりの早期化に有効である．
- (3) プラズマアシスト点火の効果は希薄燃焼になるほど顕著になり，最大燃焼圧力は向上し，燃焼時間は短縮する傾向がみられた．
- (4) マイクロ波を印加した場合，トリガースパークのみの場合では点火できなかった当量比 0.65 と 0.60 の希薄領域の拡大が可能になった．

<参考文献>

- 1) 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)
- 2) 服部仁樹，安里勝雄，他，日本機械学会 熱工学コンファレンス 2010 講演論 pp295-296(2010)
- 3) 篠原祐太，野村浩司，中谷辰爾，津江光洋，氏家 康成，日本機械学会2015年度年次大会，G0700706

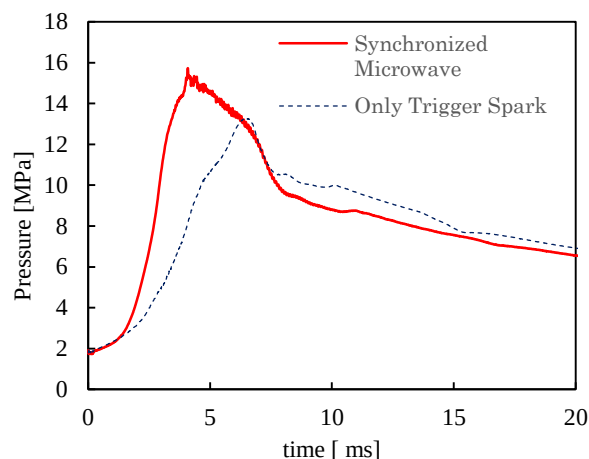


Fig.8 Pressure history ($\phi= 0.85$)

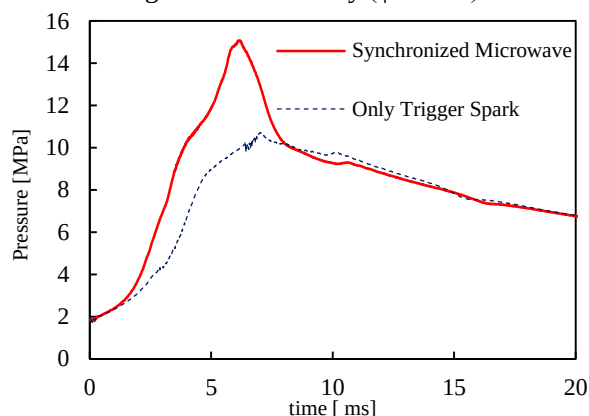


Fig.9 Pressure history ($\phi= 0.75$)

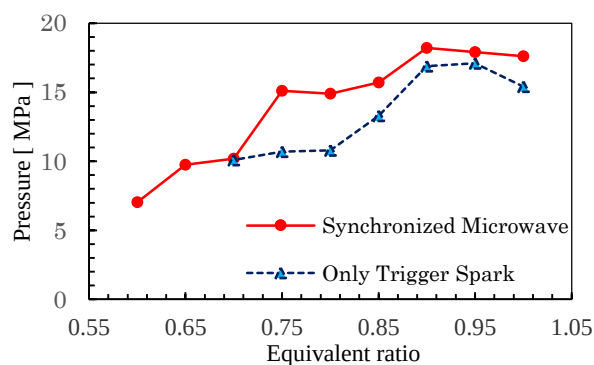


Fig.10 Relations between equivalence ratio and maximum pressure

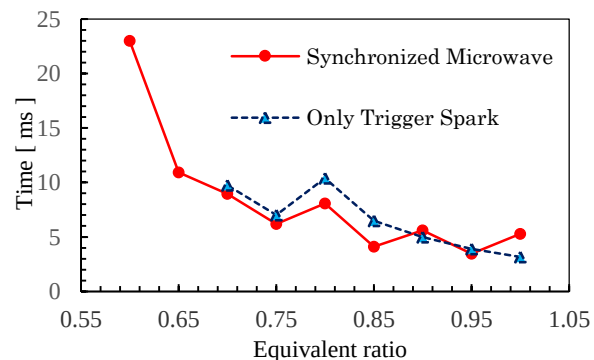


Fig.11 Relations between equivalence ratio and burning time