

小特集 プラズマ支援燃焼の現状と展望

6. 非平衡プラズマを用いたガソリンエンジン燃焼の改善

6. Combustion Improvement of Gasoline Engine by Non-Thermal Plasma

池田 裕二, 西山 淳

IKEDA Yuji and NISHIYAMA Atsushi

イマジニアリング株式会社

(原稿受付：2013年2月19日)

近年、内燃機関の燃焼改善などを目的とした非平衡プラズマを適用したプラズマ燃焼支援が注目されている。本研究では、マイクロ波を用いた非平衡プラズマ技術を内燃機関に適用し、既存エンジンの構造変更なしに燃費改善、高効率を実現する革新的なマイクロ波プラズマ燃焼システムの研究、開発を進めている。ここでは、マイクロ波プラズマの生成原理、システム構成、火花点火機関に本技術を適用した際の燃焼改善効果をご紹介します。

Keywords:

SI engine, ignition, microwave plasma, cyclic fluctuation

6.1 はじめに

火花点火機関の高効率化を実現するために、高圧縮比化、高タンブル化、混合気の希薄化または高EGR化、直噴、過給など、様々な燃焼技術の適用が試みられている(図1)。これらの技術の適用は、火花放電の引き伸ばし、初期火花核生成の不安定化など混合気の着火に過酷な状況を生じさせ、燃焼変動を増加させる要因となる[1]。

このような過酷な条件下においても安定着火が実現できれば、更なる高効率化を図ることができる。また、着火性が悪い含水エタノールなどの難燃性燃料を用いた場合にお

いても安定着火が可能となれば、燃料選択性の広がり、燃料精製コストが抑えられるなどのメリットもある。

安定着火を実現することを目的として、レーザ着火、高周波着火、コロナ着火、そしてマイクロ波プラズマ着火が研究開発されている[2-10]。著者らは、マイクロ波を用いた非平衡プラズマ生成技術を確立し、そのプラズマ技術を内燃機関に適用することでプラズマ燃焼支援の燃焼効果の実証を行ってきた[5-10]。従来のマイクロ波のみで生成する熱プラズマとは異なり、火花放電をプラズマの核とし、マイクロ波を供給することでプラズマを拡大する。マイクロ波をパルス制御することで非平衡プラズマの生成が可能である。このマイクロ波非平衡プラズマを火花点火機関に適用するためのシステム開発を行ってきた。本システムは、従来のエンジン形状を変更することなく、着火改善が可能である。これまでに、圧縮膨張機関、単気筒エンジン、実機エンジンに本技術を適用し、燃焼改善効果を実証してきた。ここでは、マイクロ波を用いた非平衡プラズマの原理、ガソリンエンジンの着火に適用した際のシステム構成、燃焼改善効果および応用事例を紹介する。

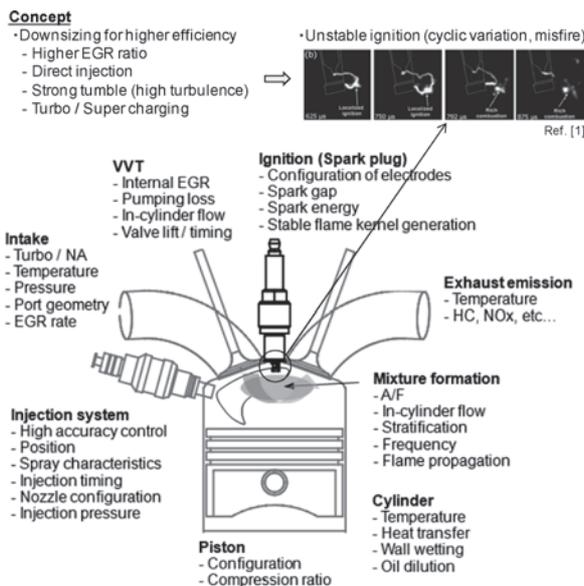


図1 ガソリンエンジンの開発動向[1].

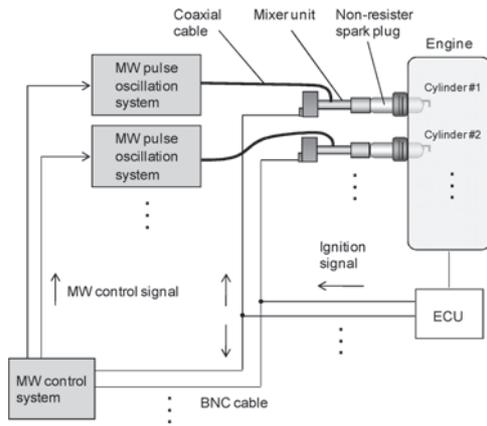


図2 プラズマ燃焼システムの概略図。

た。点火プラグでは放電ギャップが1 mm程度と狭いため、小さな入力エネルギー（50 mJ以下）にてプラズマを生成することが可能であるが、生成されたプラズマの体積は小さい。この小さなプラズマである火花放電を成長させるために電磁波の一種であるマイクロ波を利用する。マイクロ波により生成された強電界によりプラズマ中の電子が加速され、電子なだれによりプラズマが拡大する。本手法ではプラズマの核は従来のエンジンの着火に用いられている火花放電であるため、2 MPaを超える圧力下においてもマイクロ波プラズマ生成が可能であること、プラズマ生成に必要とされるマイクロ波エネルギーは大きくないこと、マイクロ波をパルス制御することにより非平衡状態を維持できることが大きな特徴である[6]。マイクロ波によるプラズマ領域の拡大（体積着火）、プラズマ中に生成されたラジカルによる燃焼促進効果により、着火安定性の向上を図る。

6.3 マイクロ波プラズマ燃焼システム

多気筒エンジンでのプラズマ燃焼試験の実験装置の概略を図2に示す。本システムは、マイクロ波パルス発振器、マイクロ波伝送用の同軸ケーブル、火花放電用の高電圧とマイクロ波の高周波を混合するミキサー回路、実機エンジンに装着する点火プラグ、火花点火時期を基にマイクロ波パルス発振を制御する制御システムから構成される。本システムは、従来のエンジンの構造を変更することなく適用可能である。図3にミキサー回路および点火プラグの概略を示す。通常の点火プラグは中心電極、エンジンへ取りつけるためのネジ部、それらを絶縁するセラミックより構成されており、同軸伝送路となっている。マイクロ波は同軸伝送路により伝送可能であることに着目し、通常の点火プラグを介してマイクロ波も燃焼室に供給することを考え、火花放電用の高電圧パルスとマイクロ波を混合するミキサー回路を開発した[8]。ミキサー回路内では、高電圧パルス、マイクロ波伝送路それぞれが、それぞれ他方へ逆流しないように設計した。中心電極に沿ってマイクロ波を伝送するため、抵抗レスの点火プラグを使用した。火花放電が生じている際にマイクロ波を供給することで火花放電により生成したプラズマにマイクロ波が吸収され、放電ギャッ

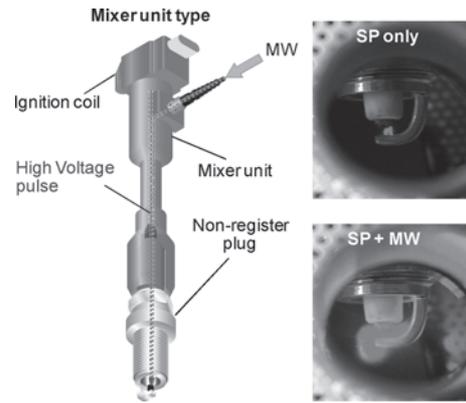


図3 ミキサー回路の概略および放電ギャップにて生成されたマイクロ波プラズマの写真。

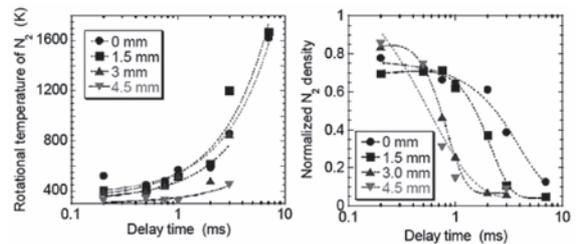
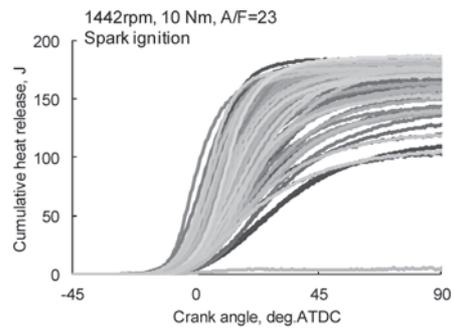
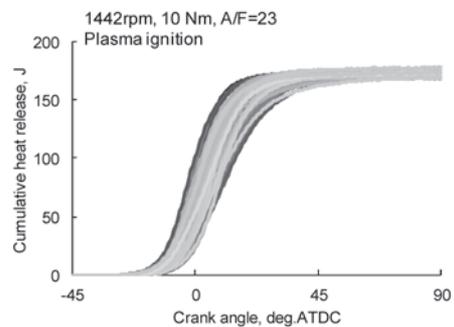


図4 マイクロ波プラズマの回転温度[9]。



(a) 火花点火



(b) マイクロ波プラズマ点火

図5 熱発生量（連続300サイクル）。

プを中心としてプラズマが拡大する。マイクロ波プラズマの回転温度を計測した結果を図4に示す[12]。マイクロ波パルスを μs オーダーの細かいパルス制御することで、数msのマイクロ波発振では回転温度が600 K以下の非平衡状態を維持しており、プラズマ起因のNO_x生成はない。マイクロ波発振源にはマグネトロンを用いてきたが、現在は小

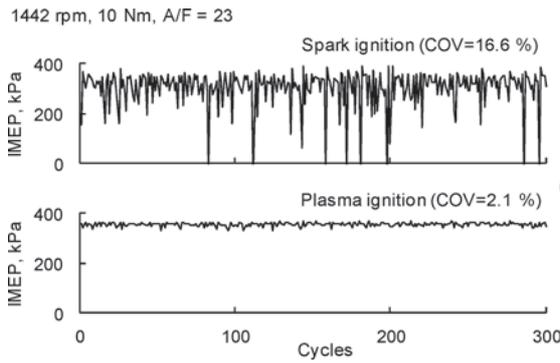


図6 IMEPのサイクル変動.

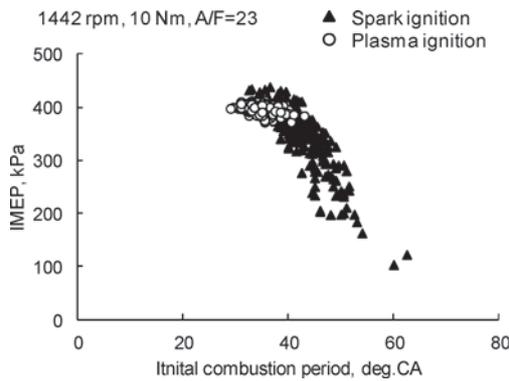
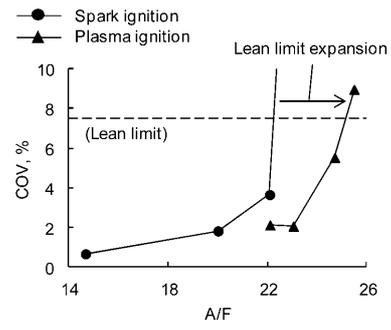


図7 初期燃焼期間とIMEPとの関係.

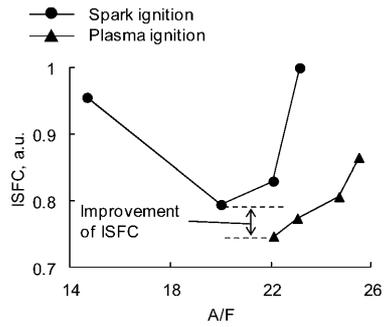
型の半導体発振器を用いたシステムを開発し、適用している。半導体発振器は発振の立ち上がりが速く、細かいパルス制御が可能で、発振周波数の細かい制御が可能であり、小型かつ軽量であるため車載に有利などの多くの利点がある。

6.4 ガソリンエンジンでの燃焼改善効果

多気筒実機エンジンにマイクロ波プラズマ燃焼を適用した際の熱発生量を図5に示す。空燃比(A/F)を量論混合比(14.7)より希薄化した条件(A/F=23)であり、連続した300サイクルの結果を示している。通常の火花点火では熱発生が立ち上がるタイミングが大きく変動しており、いくつかのサイクルでは熱発生が十分に立ち上がらず部分燃焼となるサイクルがみられる。一方、プラズマ燃焼時では火花放電時と比較して、熱発生が立ち上がる時期の変動が小さくなり、部分燃焼となるサイクルもみられない。図6に同じ条件における図示平均有効圧力(IMEP)のサイクル変動を示す。火花点火の場合では、部分燃焼もしくは失火に至るサイクルもみられ、IMEPの標準偏差を平均値で除して求められる燃焼変動率(COV)も16.6%と非常に大きい。プラズマ燃焼時ではIMEPはサイクル毎に安定しておりCOVも2.1%と小さく、プラズマにより希薄な条件での燃焼安定性が大きく改善されている。初期燃焼期間とIMEPとの関係を図7に示す。ここで、初期燃焼期間とは点火時期から燃焼質量割合が10%に到達する時期までのクランク角度と定義する。火花点火の場合、初期燃焼期間の変動が大きく、初期燃焼期間が長いサイクルにおいて燃焼時期が遅くなるためにIMEPが低くなる。プラズマ燃焼時



(a) 燃焼変動 (COV)



(b) 燃料消費率

図8 A/Fと燃焼特性との関係.

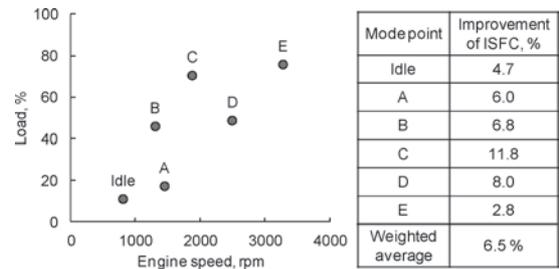


図9 マイクロ波プラズマによる燃費改善効果.

は初期燃焼期間のばらつきが小さく安定している。この初期燃焼期間の安定化がリーン条件においてもIMEPが低下するサイクルを防ぎ、燃焼変動が少なくなる要因である。図8に、A/FとCOVおよび燃料消費率との関係を示す。A/Fが大きくなり混合気が希薄になると、ある時点にて燃焼が不安定になり変動率が急激に増加する。COV=5%を安定燃焼の閾値とした場合、通常点火ではA/F=22程度で燃焼限界となるが、プラズマ着火によりA/F=25程度まで燃焼限界が拡大した。量論混合比から希薄になると、ポンプロス低減、冷損低減、比熱比の改善などの効果により燃費が改善する。火花点火の場合、A/F=20程度まで燃料消費率は低下しているが、それ以上希薄になると初期燃焼の不安定化、火炎伝播速度の低下により部分燃焼サイクルが生じ、未燃炭化水素が増加するため燃費が悪化する。プラズマ燃焼の場合、初期燃焼が改善し希薄条件でも安定燃焼が実現できるためA/F=22程度まで燃費が改善する。図9に示すように、複数のモード運転代表点での試験結果から、プラズマ燃焼により6.5%の燃費改善を達成した[13]。このプラズマ着火技術は、着火性の低い含水エタノールなど

の燃料の燃焼改善にも効果がある[14]。含水エタノールの含水率が高い状態でも安定燃焼が可能となれば、燃料精製にかかるコストを大幅に削減することが可能である。また、着火改善への適用だけでなく、排気管でのプラズマ生成により、エンジン始動時の未燃炭化水素排出低減の可能性も実証されている[15]。

6.5 まとめ

本研究では、従来の火花点火機関を大きく変更することなく、安定燃焼を実現するプラズマ着火システムを開発、研究を進めている。多気筒実機エンジンに適用することで、リーン限界拡大、モード換算燃費の改善効果が得られた。着火性が低い燃料の燃焼改善および始動時の未燃炭化水素排出低減にも効果があることが示されている。現在、実用化に向けてシステムの小型化、制御の高精度化を中心に開発を進めている。

謝辞

本研究の一部は、平成23年度 NEDO “省エネルギー革新技術開発事業”の一環として実施した。

参考文献

- [1] R. Dahms *et al.*, Proc. Combustion Institute, **32**, 2743 (2009).
- [2] 平等拓範：レーザー研究 **38**, 576-584 (2010).
- [3] 田上公俊ほか：自動車技術会論文集 **41**, 1069 (2010).
- [4] 白石泰介ほか：日本燃焼学会誌 **51**, 31 (2009).
- [5] Y. Ikeda *et al.*, SAE Paper No. 2009-01-1049, (2009).
- [6] Y. Ikeda *et al.*, SAE Paper No. 2009-01-1050, (2009).
- [7] A. DeFilippo *et al.*, SAE Paper No. 2011-01-0633, (2011).
- [8] A. Nishiyama *et al.*, SAE Paper No. 2012-01-1139, (2012).
- [9] V. Rapp *et al.*, J. Combustion **2012**, Article ID 927081 (2012).
- [10] B. Wolk *et al.*, Combustion Flame, in print, (2013).
- [11] Y. Ikeda *et al.*, AIAA Paper No. 2006-965, (2006).
- [12] M. ElSabbagh *et al.*, Jpn J. Appl. Phys. **50**, 076101, (2011).
- [13] 西山 淳ほか：自動車技術会学術講演会前刷集No.25-11, 27 (2011).
- [14] 文 雅司ほか：第22回内燃機関シンポジウム, in CD-ROM (2011).
- [15] 池田裕二ほか：自動車技術会学術講演会前刷集, No. 100-08, 9 (2008).