

論文・解説

24

予混合圧縮着火燃焼におけるイオン電流計測 Measurement of Ion Current in Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion

田中達也*¹ 榎原和晃*² 田端道彦*³

Tatsuya Tanaka

Kazuaki Narahara

Michihiko Tabata

吉山定見*⁴ 富田栄二*⁵

Sadami Yoshiyama

Eiji Tomita

要約

イオン電流プローブを予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジンに装着し、燃焼センサとしての可能性を検討した。HCCI燃焼におけるイオン電流は、火花点火燃焼の場合と比較して、一つのピークを持つ単純な波形を示した。イオンは主に化学電離に基づく熱発生過程で生成されており、プローブはHCCI燃焼の反応そのものを検知している可能性が高い。イオン電流生成割合と質量燃焼割合は、運転条件に関わらず、各割合が10%から70%時期において高い相関関係を持っており、イオン電流の生成割合70%発生時期までの質量燃焼割合を推定できることがわかった。またサイクル毎の最大イオン電流時期は、サイクル毎の最大筒内圧力時期と相関があり、イオン電流情報によりサイクル毎の燃焼時期変動を検知できる可能性があることがわかった。

Summary

The feasibility of an ion current probe as a combustion sensor was investigated. The ion current probe was applied to a HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) engine. Ion current in the HCCI combustion showed one-peak simple waveform compared to that in the spark ignition combustion. It was found that ions were predominantly produced in the heat release process caused by the chemical ionization, and the ion current probe has a high possibility to detect HCCI combustion itself. There was high relation between the timing of ion current and the timing of the mass fraction burned from 10% to 70%, regardless of engine conditions, and it was found that the mass fraction burned until 70% could be presumed by detecting the generation ratio of the ion current. Also, there was high relation between the timing of maximum ion current and the timing of the maximum pressure in each cycle. Therefore, it was found that the probe has a possibility to detect the fluctuation of the combustion timing in each cycle.

1. はじめに

予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition, 以下 HCCI) は、低燃費と低NO_x排出を両立する次世代燃焼技術として期待されている。しかしながら、HCCI燃焼においては、着火時期およびその後の燃焼過程の制御が大きな課題であり、それらの制御を効率的に行うために燃焼状態を検知することが必要になっている。

イオン電流プローブ法は、燃焼反応の電気的性質を利用した燃焼診断技術の一つとしてよく知られている⁽¹⁾。イオ

ン電流プローブを用いた火炎面の検知、火炎伝ば速度の測定および火炎構造の観測は、バーナ火炎およびエンジンシリンダ内火炎においてしばしば行われてきた⁽²⁾。反応帯には多くのイオンが存在し、そのほとんどは陽イオンと電子からなる弱電離プラズマであると言われている⁽³⁾。プラズマ診断法は、ラングミュアプローブ法あるいは静電探針法として古くから利用されている⁽⁴⁾。大東らは、このラングミュアプローブ法の応用として、点火プラグ自身をプローブ (センサ) として火炎帯の検知を行い、火花点火 (SI: Spark Ignition) エンジンの着火遅れを測定する方法を提案

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

*4, 5 岡山大学工学部
Faculty of Engineering, Okayama University

した⁽⁵⁾。この方法では点火プラグ自身がセンサであるため、新たにセンサを取り付けるための加工や燃焼室の改造等を必要とせず、極めて簡単な検知回路を付加することで燃焼状態を検知することができる。近年になって、SIエンジンの燃焼診断に用いられるようになった^{(6),(7)}。

火炎帯に現れる陽イオンは、化学電離に起因して生じることがCalcoteらによってパーナ火炎で確認されている⁽⁸⁾が、エンジンシリンダ内においては、火炎伝ばとともに燃焼室内の圧力や温度が上昇することから、化学電離以外に熱電離によるNOのイオン化が指摘されている⁽⁶⁾。このように、イオン電流の発生メカニズムには不明な点も多く、燃焼状態とイオン化反応を明確にした報告はない。

HCCI燃焼は、火花点火による火炎伝ばとは異なり、混合気の多点自己着火によって短時間の間に筒内でほぼ一斉に燃焼反応が起こると考えられている。このような火炎伝ばではない空間的にほぼ均一な燃焼を考えると、点火プラグをイオン電流プローブとして使ったとしても、HCCI燃焼の反応を総合的に検知できる可能性がある。

Strandhらは、点火プラグをイオン電流プローブとして、吸気加熱方式のHCCIエンジンにおいて、イオン電流が局所で検知されていること、筒内の圧力とイオン電流の間に相関があることを報告している⁽⁹⁾。またVressnerらは、燃焼室に7本の陽極のみのプローブを設け、イオン電流の発生時期、最大電流値は燃焼室壁温に依存するという基礎研究を行っている⁽¹⁰⁾。このようにHCCI燃焼のイオン電流の基礎的な研究は、燃料量、エンジン回転数固定のもとで、着火時期を吸気温度等で変化させることによって行われている^{(9),(10)}が、実用的なHCCIエンジンにおけるイオン電流プローブの燃焼センサとしての研究に関する報告はない。

そこで本研究では、現時点で実用に近いと考えられる高温の残留ガスを用いる方式のガソリンHCCIエンジンに、通常の点火プラグを利用したイオン電流プローブを適用し、幅広いエンジン運転条件でイオン電流の特性を調査し、HCCI燃焼経過とイオン電流波形との関係を明らかにすることによって、イオン電流プローブのHCCI燃焼センサとしての可能性を検討した。

Table 1 Test Engine Specifications

Number of Cylinders (-)	1
Bore x Stroke (mm)	78.0 x 78.4
Piston Swept Volume (cm ³)	375
Compression Ratio (-)	12.0:1
Fuel Supply	Port Fuel Injection
Fuel	Gasoline RON:91
Number of Valves (-)	4 (In.:2, Ex.:2)
Combustion-Chamber Shape	Pentroof

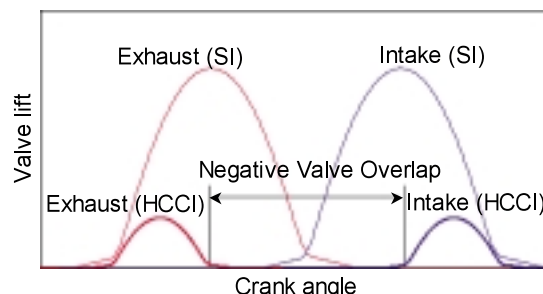


Fig.1 Schematic of the Negative Valve Overlap for HCCI Combustion

2. 実験装置および実験方法

2.1 ガソリンHCCIエンジン

Table 1に実験に供試したエンジンの基本諸元を示す。供試エンジンは、量産エンジンをベースとした1気筒あたり吸排気バルブを各2個もつ排気量375cm³の単気筒エンジンである。ボアおよびストロークは、それぞれ78mmと78.4mmである。圧縮比は12.0:1、燃料供給方式は量産エンジンと同じポート噴射方式であり、供試燃料にはリサーチオクタン価が91のガソリンを使用した。本HCCI方式は、前サイクルの高温の残留ガスを用いて混合気の圧縮自己着火を実現するものである⁽¹¹⁾。この方式は、Fig.1に示すように、前サイクルの高温の燃焼ガスを筒内に持ち越すために、排気バルブの早期閉時期と吸気バルブの遅い開時期を組み合わせた、いわゆる「ネガティブバルブオーバーラップ」という機構として特徴づけられる。点火プラグは、燃焼室の中央に設置している。また圧力計測用のピエゾ素子をもつ燃焼圧力センサをエンジンヘッドに取り付けている。エンジンのクランクシャフトは直流式電気動力計に連結されており、モータリングおよび燃焼時の回転数の調整や負荷の測定が行える。実験は様々なエンジン運転条件で行った。エンジンの運転条件をTable 2に示す。吸気温度と湿度は空調機によりそれぞれ300K、60%一定になるようにした。

2.2 イオン電流検知装置

Fig.2にイオン電流検知回路の概略を示す。イオン電流プローブの位置がイオン電流信号に及ぼす影響を調査するために、第二の点火プラグをシリンダヘッドの吸気側に取り付けている。点火プラグの中心電極と側方電極の間に6あるいは12ボルトの電圧を印加した。電子の移動によって

Table 2 Test Conditions

Engine Speed Ne (rpm)	1250-2500
Valve Overlap OL (CA deg.)	-140, -160, -180
Air Fuel Ratio AFR (-)	14.3-17.1
Intake Air Temperature (K)	300 fixed
Intake Air Humidity (%)	60 fixed

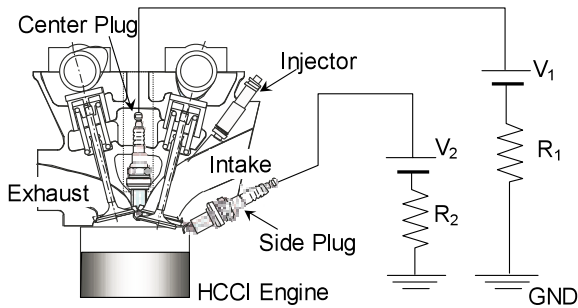


Fig.2 Schematic Diagram of the Ion Current Detection Circuit

検知回路を流れる電流は、回路中の抵抗両端の電位差を測定することにより計測した。検知回路中の抵抗 R_1 および R_2 の抵抗値は90kである。筒内の圧力とイオン電流は、データ収集装置によって同時計測した。データ収集装置のサンプリング周波数は、各エンジン回転において、0.5deg.CAである。

3. 実験結果および考察

3.1 HCCI燃焼におけるイオン電流波形の特性

本節では、HCCI燃焼におけるイオン電流波形の特性について述べる。Fig.3に単一サイクルのSI燃焼におけるイオン電流と筒内の圧力信号を示す。イオン電流は燃焼室の中心に設置した点火プラグにより測定した。単一サイクルのSI燃焼のイオン電流は、複数の電流ピークを持っており、筒内の圧力信号との対応が弱いことがわかる。一方で、Fig.4の単一サイクルのHCCI燃焼におけるイオン電流は一つの電流ピークを持っており、筒内の圧力信号に良く対応している。この理由として、HCCI燃焼では、SI燃焼のような空間的に反応帯が伝ばするような燃焼が起こっておらず、燃焼室で反応が総括的に起こっているためにイオン電流信号に一つのピークのみが現れたのではないかと考えられる。

空燃比は、HCCI燃焼を制御する上で重要なパラメータである。Fig.5に、種々の空燃比におけるサイクル平均したイオン電流のクランク角度毎の信号を示す。エンジン回転数 $N_e=1,500\text{rpm}$ 、バルブオーバーラップ $OL=-160\text{deg.}$ の結果である。燃焼初期のイオン電流の立ち上がり時期は、空燃比によらずほぼ同じであり、イオン電流のピーク時期を含む燃焼後半において空燃比の影響が特に顕著に現れている。このことから、イオン電流の立ち上がり時期は、空燃比の影響をあまり受けず、立ち上がり時期以後の例えばイオン電流のピーク時期やピーク値などは空燃比などのガス組成の影響を受けているのではないかと推察される。

次に、HCCI燃焼では、空間的に均一な燃焼が起こっているのかどうかについて検討した。Fig.6に、イオン電流プローブの位置がイオン電流信号に及ぼす影響を示す。各イオン電流は、中心点火プラグと側方点火プラグにおいて

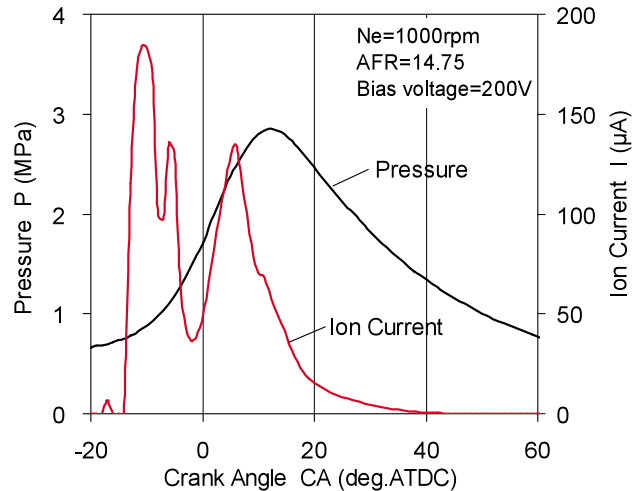


Fig.3 Ion Current and In-cylinder Pressure Signals of the SI Combustion in a Single Cycle

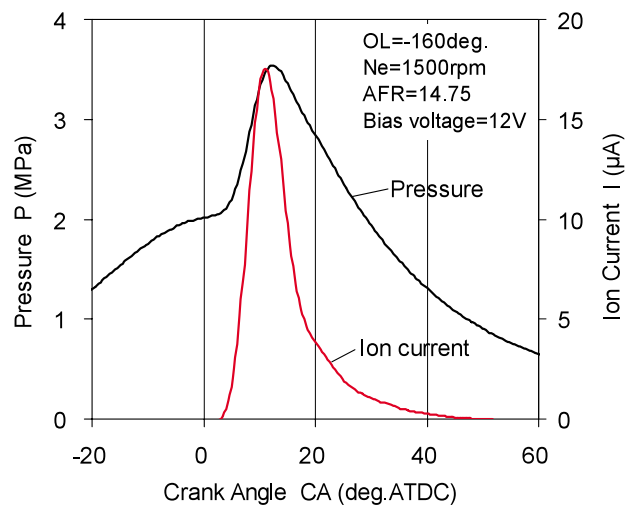


Fig.4 Ion Current and In-cylinder Pressure Signals of the HCCI Combustion in a Single Cycle

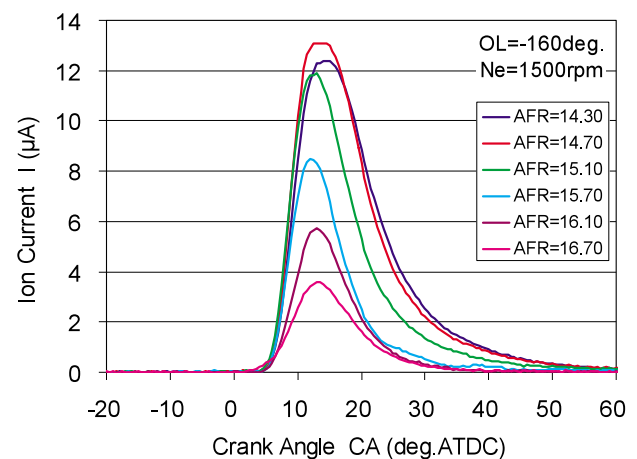


Fig.5 Effect of Air Fuel Ratio on Ion Current Signal

同時に測定した。側方点火プラグは吸気ポート側に設置している。印加電圧はそれぞれ6ボルトとした。燃焼の初期では、側方プローブにおけるイオン電流の発生時期は、中

心プローブの場合に比較して1.0deg.CA (Crank Angle) 程度遅れ、その最大値も低下している。両プローブにおけるイオン電流の発生時期および大きさの差には、燃焼室内の燃料濃度や温度分布が影響していると推察されるが、Fig.5の結果から、燃焼初期のイオン電流の立ち上がり時期は、空燃比によらずほぼ同じであることから、ここでは混合気の不均一性の影響は少ないと思われる。したがってVressnerらが報告しているように、側方プローブ近傍のガス温度が比較的低いため、イオン電流の発生時期が遅れて最大値が低下した¹⁰⁾のではないかと考えられる。燃焼後期において、イオン電流の発生時期および最大値の差はほぼなくなっている。これは、各プローブは局所の燃焼を検知しているが、燃焼後期では、燃焼が燃焼室の大部分を覆うように起こっており、その全体的な燃焼状態を検知したために、結果として局所検知の性質が薄れたと考えられる。以上のことから、HCCI燃焼では、イオン電流プローブ位置に関わらず、得られるイオン電流信号は、立ち上がり時期、ピーク値が異なるものの、それらのプロファイルは相似であることから、通常の点火プラグ位置である中心プローブにおいても、HCCI燃焼を総合的に示すイオン電流信号が得られる可能性があることを示している。

3.2 HCCI燃焼におけるイオン化反応

前節でイオン電流波形の特性を述べたが、本節では、イオン電流がHCCI燃焼のどのような情報を検知しているのかについて述べる。一般的にSI燃焼では、イオンの生成は化学電離と熱電離に影響されていると言われている。Fig.4に示したように、SI燃焼の場合のイオン電流信号は、化学電離、熱電離に対応すると考えられている複数のイオン電流ピークを持っている。

化学電離の程度を示す指標として、燃焼反応の割合を示す熱発生率がある。ゆえに化学電離は、最大熱発生率を示す時期付近で急速に進行すると考えられる。Fig.7に、エンジン運転条件を変化させた際のイオン電流が最大となる時期CA-I_{max}と熱発生率が最大となる時期CA-ROHR_{max}の関係を示す。中心プローブにおけるイオン電流が最大となる時期は、熱発生率が最大となる時期に対して一定で遅れていることがわかる。この遅れは、プローブによるイオン電流検知の局所性⁹⁾に起因しており、燃焼室内で熱発生が開始された位置とイオン電流が検知された位置が異なるために、両者が最大値を示す時期が2deg.CA程度ずれたものと考えられる。

熱電離は、イオン化エネルギーの低いNOの電離過程が代表的で、燃焼後半のサーマルNOの生成に対応した反応過程と重なっているといわれている⁶⁾。熱電離の指標の一つとして、ここでは燃焼室内の温度を選定し、熱電離は、最大温度時期付近において最も活発に起こると考えた。Fig.8に、エンジン運転条件を変化させた際のイオン電流が最大となる時期CA-I_{max}と温度が最大となる時期CA-T_{max}

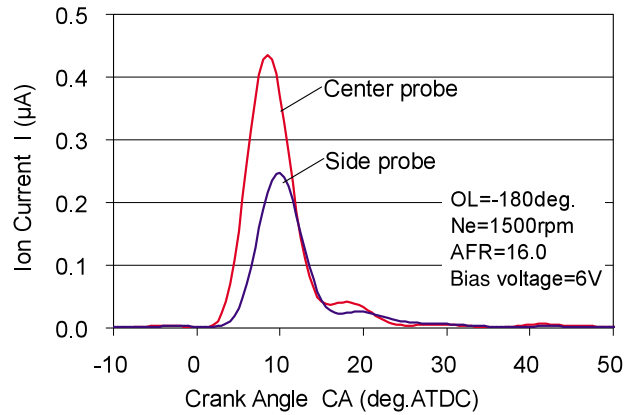


Fig.6 Effect of the Location of the Ion Current Probe on the Averaged Ion Current Signals

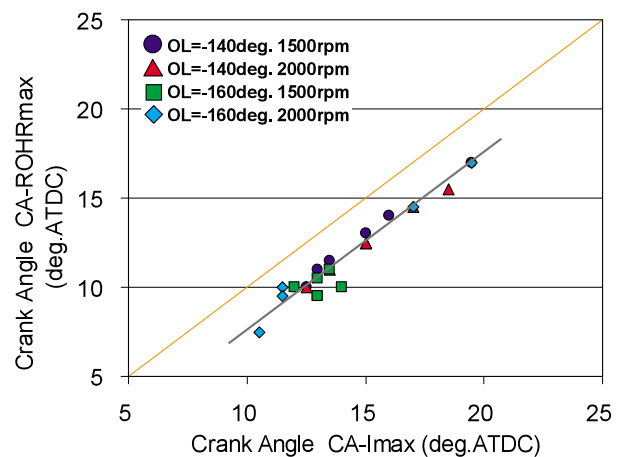


Fig.7 Relationship between the Crank Angle of the Maximum Ion Current and the Crank Angle of the Maximum Rate of Heat Release with Changing the Engine Combustion Conditions

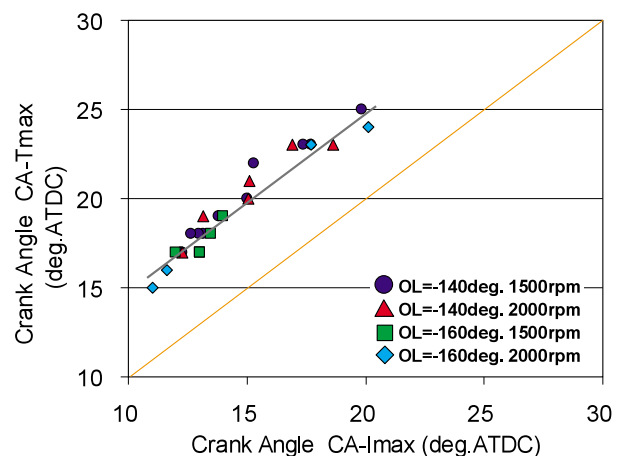


Fig.8 Relationship between the Crank Angle of the Maximum Ion Current and the Crank Angle of the Maximum Temperature with Changing the Engine Conditions

の関係を示す。エンジンの運転条件の変化にも関わらず、イオン電流が最大となる時期と圧力が最大となる時期の間

の相関関係は保たれているが、イオン電流が最大となる時期は、温度が最大となる時期に対して常に5deg.CA程度早い。

Fig.7およびFig.8から、イオンは、化学電離に基づく熱発生過程で生成されている可能性が高いことが推測されるが、これらの結果からのみで判断することはできない。そこで、燃焼後半の熱電離と関係が深いNO_x排出について述べる。このテスト条件におけるNO_xは、数ppmレベルの極めて低い排出量であることを確認している。したがって、HCCI燃焼におけるイオン電流は、HCCI燃焼の化学電離に対応した熱発生反応を主として検知している可能性が高く、サーマルNOの生成に対応した熱電離によるイオン化反応の影響は比較的少ないと考えられる。

3.3 イオン電流と熱発生時期の関係

前節において、イオン電流がHCCI燃焼の反応自体を検知している可能性が高いと説明した。HCCIの燃焼センサにとって、反応の時間経過に関する検知能力は重要である。反応量などの絶対量についてはセンサの経年劣化により検知に問題がでてくるが、時間経過であれば経年劣化の影響を受けにくく、着火時期や燃焼期間等の有効な情報が得られる。したがって本節では、イオン電流と筒内圧力信号との時間経過の関係について述べる。Fig.9に、典型的な圧

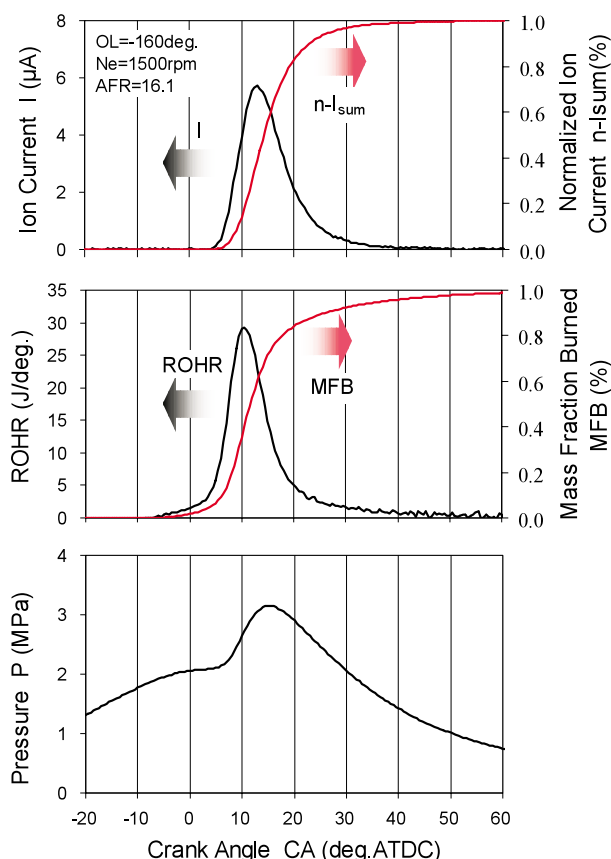


Fig.9 Typical Signals of Ion Current, Normalized Ion Current, Rate of Heat Release, Mass Fraction Burned and Pressure

力、熱発生率、質量燃焼割合、イオン電流および正規化した積算イオン電流値の時間経過を示す。正規化した積算イオン電流値はイオン電流を積算して、積算値が一定となった時期を1.0として定義した。イオン電流波形は、反応の指標である熱発生に良く対応していること、正規化した積算イオン電流値は質量燃焼割合と相似な時間経過を持っていることがわかる。

Fig.10に正規化した積算イオン電流が所定値となるCA時期と質量燃焼割合が同割合となるCA時期の関係を示す。図に示すように、10%から70%のイオン電流および熱発生時期において、正規化した積算イオン電流値の時期と熱発生率時期の間に強い相関が見られる。しかしながら、CA-80%以上では、相関が弱くなっている。この理由として、燃焼後期におけるイオン電流が、主として既反応帯におけるイオンの再結合によって流れており、前節で示した化学電離を含む熱発生への依存性が低下していること、またFig.9に示したように、燃焼後期の質量燃焼割合および積

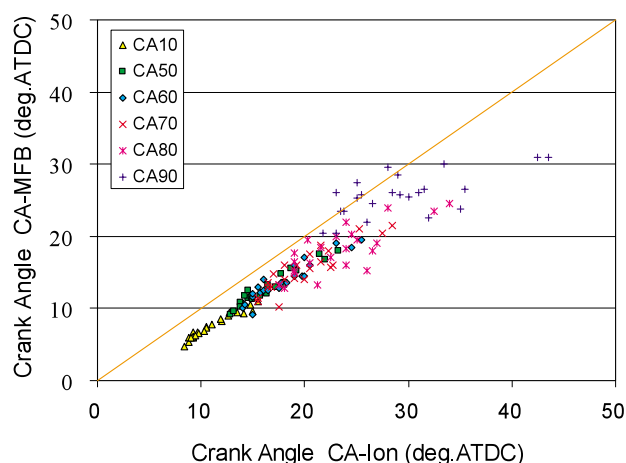


Fig.10 Relationship between the Crank Angle of the Normalized Ion Current and the Crank Angle of the Mass Fraction Burned

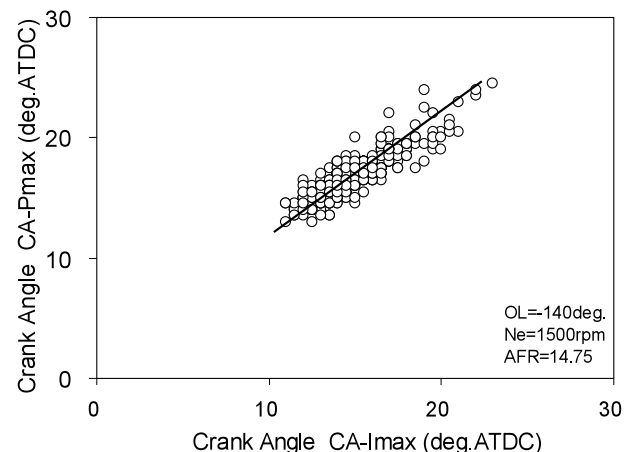


Fig.11 Relationship between the Crank Angle of the Maximum Ion Current and the Crank Angle of the Maximum Pressure with 345 Cycle Plots

算イオン電流割合の変化量が少なく、質量燃料割合および電流生成割合時期判定に誤差が載りやすいことによると考えられる。

以上の結果から、エンジン運転条件が本テストの範囲内で変化したとしても、イオン電流の時間的な発生履歴から熱発生時期を求め、70%発生時期までの質量燃焼割合を推定できることがわかった。

3.4 サイクル毎のイオン電流最大値時期

燃焼センサにとって、燃焼時期の変動検知は、燃焼の安定化を図る上で重要な課題となるため、本節では、サイクル毎のイオン電流信号について検証した。Fig.11にイオン電流が最大となる時期 $CA-I_{max}$ と筒内圧力が最大となる時期 $CA-P_{max}$ の345サイクル分の関係を示す。イオン電流が最大となる時期と筒内圧力が最大となる時期の間には相関が見られる。このことから、イオン電流が最大となる時期の情報は、HCCI燃焼のサイクル毎の燃焼時期変動を検知する手段として利用できる可能性があることがわかった。

4. まとめ

通常の点火プラグを利用したイオン電流プローブを、ネガティブバルブオーバーラップ方式のガソリンHCCIエンジンに適用し、HCCI燃焼反応におけるイオン電流の特性およびHCCI燃焼経過とイオン電流波形との関係について調査した。イオン電流プローブによりイオン電流の発生時期を検知することで、熱発生の発生時期を知ることができるなど、基礎的な部分において、イオン電流プローブがHCCI燃焼センサとしての可能性を持っていることを確認した。以下に得られた結果をまとめる。

1. HCCI燃焼における単一サイクルのイオン電流信号は、単純なプロファイルを示し、一つの最大値を持つ。
2. イオン電流プローブの位置に関わらず、得られるイオン電流信号は相似のプロファイルを持っている。
3. イオン化反応過程は、熱発生に起因する化学電離に強く影響されており、反応後半の熱電離の影響は少ないと考えられ、イオン電流プローブはHCCI燃焼の化学電離反応そのものを検知している可能性が高い。
4. イオン電流生成割合と質量燃焼割合は、エンジン運転条件に関わらず、それぞれの割合が10%から70%の時期において高い相関関係を持っており、イオン電流の生成割合から熱発生時期を求め、70%発生時期までの質量燃焼割合を推定できる。
5. サイクル毎のイオン電流が最大となる時期は、サイクル毎の筒内圧力が最大となる時期と相関があり、サイクル毎のイオン電流情報によりHCCI燃焼のサイクル毎の燃焼時期変動を検知する手段として利用できる可能性がある。

参考文献

- (1) Lawton, J., et al.: Electrical Aspects of Combustion, Clarendon Press, Oxford (1965)
- (2) Tomita, E., et al.: Turbulent Premixed Flames Under Lean Conditions Studied with Ion Current Measurement in a Homogeneous Charge Spark-Ignition Engine, SAE Paper, No. 2000-01-1940 (2000)
- (3) 金原：気体の燃焼物理，葦華房（1985）
- (4) 堤井：プラズマ基礎工学，内田老鶴園（1997）
- (5) 大東 他：ガソリン機関における点火遅れと火炎伝ば，機論（第2部），36-282，p.808-817（1970）
- (6) Saitzkoff, A., et al.: An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor, SAE Paper, 960337 (1996)
- (7) 浜本 他：点火電極イオンプローブによる燃焼診断，機論（B編）60-572，p.1486-1492（1994）
- (8) Calcote, H. F., et al.: Negative and Secondary Ion Formation in Low-Pressure Flames, 10th Symposium (Int.) on Combust., p.605-619 (1965)
- (9) Strandh, P., et al.: Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback, SAE Paper, No.2003-01-3216 (2003)
- (10) Vressner, A., et al.: Multiple Point Ion Current Diagnostics in an HCCI Engine, SAE Paper, No.2004-01-0934 (2004)
- (11) Willand, J., et al.: The Knocking Syndrome-Its Cure and Its Potential, SAE Paper, No.982483 (1998)

著者



田中達也



楢原和晃



田端道彦



吉山定見



富田栄二