

イオン電流測定によるエンジン筒内のノッキング検出

木下雅夫, 斎藤昭則, 茂木和久, 中田浩一

Study on Ion Current Behavior during Knocking in Engine Cylinder

Masao Kinoshita, Akinori Saito, Kazuhisa Mogi, Koichi Nakata

要 旨

近年, 点火栓をイオンプローブとして利用する技術が開発されており, その技術を利用して, エンジンに新たなセンサを取り付けることなく筒内の燃焼情報を検出しようという試みがなされつつある。本研究は, イオン電流測定によるノッキング検出の原理を明確にすることを目的としている。ここでは, イオン電流振動の解析を容易にするため, 単筒エンジンにn-ペンタンと酸素とアルゴンの予混合気を導入して, 火花点火による単発燃焼を行い, ヘビーノックを発生させた。そして, これらのノッキング現象を複数点で測定したイオン電流と圧力, ならびにシャドウグラフ撮影

した燃焼観察結果を用いて検討した。その結果, 自着火に伴って発生した衝撃波がイオンプローブに到達すると, 圧力と同様にイオン電流も急増することが確認できた。さらに, ノッキング時のイオン電流振動の周波数特性はイオンプローブの極性によって変わり, 圧力の周波数特性とは必ずしも一致しないことが明らかになった。しかし, この現象はイオンと電子の移動度の違いとして説明できた。これらの結果から, ノッキング時のイオン電流は圧力波の粗密に伴って振動しているという結論を導き出した。

キーワード

ガソリンエンジン, 燃焼, ノッキング, 点火栓, イオン電流

Abstract

In recent years, technology using a spark plug as an ion probe was developed. Utilizing this technology, we could detect some combustion information, e.g., misfire and knocking, without sensors in the engine cylinders. We examined the mechanism for detecting the knocking using the ion current. In our experiments, heavy knocking occurred in a single-cylinder engine on supplying the mixture of n-pentane, oxygen and argon. The knocking was analyzed by measuring the ion current and the pressure at some positions and the results of the combustion observation with shadowgraphs. When the shock wave which occurred due to auto-ignition in the end gas arrived at the ion

probes, the ion currents rapidly increased with the pressure. Moreover, when the polarity of the ion probe was altered, the power spectrum of the ion current changed, too. It appeared that the power spectrum of the ion current did not always agree with that of the pressure during the knocking. However, we could describe these phenomena as the difference between the mobility of an ion and that of an electron. The region where the ion probe catching the ions then changes by altering the polarity. From these results, it was understood that the ion current vibrates because the ion density changes with the coarseness and minuteness of the pressure wave.

Keywords

Gasoline engine, Combustion, Knocking, Spark plug, Ion current

1. 緒論

電位差を与えた電極間に火炎が到達するとイオン電流が流れることはよく知られている。その原理を利用するとエンジンの燃焼状態を検出することができる¹⁻³⁾。近年では、点火栓をイオンプローブとして利用する技術が開発されている。この技術は、エンジンに新たなセンサを取り付けることなく、エンジン筒内の燃焼状態を検出できるため、実用的にも非常に有用な技術である。現在までに失火、ノッキング、燃焼変動等の燃焼状態が検出できることが報告されている⁴⁻⁶⁾。

ノッキング発生時のイオン電流には、筒内圧力に見られるものと同様の高周波が重畳する^{7,8)}。その高周波を検出してノッキングを判定するシステムを実用化するためには、ノッキング発生時にイオン電流が振動するメカニズムを把握しておくことが必要である。本研究⁹⁾では、ノッキング発生時のイオン電流挙動を燃焼観察の結果や圧力挙動と比較する。そして、それらの周波数特性を調べて、ノッキング現象とイオン電流の関係を解析し、イオン電流が振動するメカニズムを明らかにする。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置の概要をFig. 1に示す。ボア82mm、ス

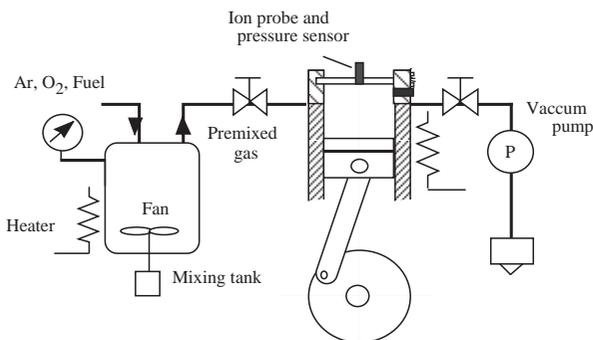


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

トローク85mm、圧縮比8の単筒エンジンに予混合気を供給し、燃焼室端面に取り付けた点火栓を利用して、単発燃焼をさせた。燃焼室はディスク形状で、燃焼観察するためには燃焼室上面に窓ガラスを取り付けた。シャドウグラフ撮影を行うためにピストン頂面にはCrメッキを施した。圧力とイオン電流を計測するためには燃焼室上面を観察用窓ガラスと同形状の鋼板とし、圧力センサ(AVL製、QH32D)とイオンプローブを、Fig. 2に示すように燃焼室の3箇所に取り付けた。イオンプローブは中心電極直径0.8mm、中心電極長さ5mmの単芯のハーメチックシール(日本電気製、P146)を用いた。ハーメチックシールの外周電極と燃焼室壁面の電位を同じにするため、ハーメチックシールは燃焼室壁面に圧入した。イオン電流の測定回路をFig. 3に示す。電源、抵抗、プローブを直列に接続して、抵抗の電圧降下量を測定することにより、イオン電流を算出した。イオン電流と圧力信号はA/D変換器を介してパーソナルコンピュータに入力した。A/D変換器のサンプリングレートは $2\mu\text{s}$ に設定した。供給電圧は+10Vと-10Vとし、挿入抵抗とプローブに印加する電圧の極性を変えて実験を行った。

予混合気の組成は、本装置で再現よくノッキングを生じさせる重要な要因であった。そのため、様々な予混合の組成を検討した。その結果、n-ペンタンとアルゴンと酸素を当量比1で混合したも

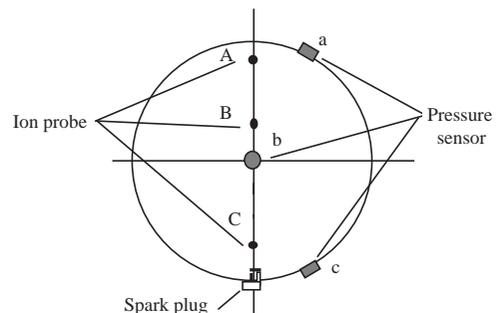


Fig. 2 Positions of ion probes and pressure sensors on combustion chamber.

のが最も再現よくノッキングを発生できることがわかり、この組成の混合気を用いて実験を行った。

2.2 実験方法

ピストンを下死点にした状態で、真空ポンプを用いてシリンダ内を0.7kPa以下に減圧した。その後、ミキシングタンクで作成した前述の予混合気を筒内圧力が100kPaになるまで充填した。手動弁を閉じた後、DCモータ(2.2kW)を用い、エンジンを800rpm相当でクランキングし、上死点前22°CAの時期に火花点火することにより単発燃焼を行い、ノッキングを発生させた。

燃焼状態はシャドウグラフ法で観察した¹⁰⁾。光源にはArイオンレーザを用い、光電子倍增管付CCDカメラ(浜松ホトニクス製、C4053)でシャッター速度を0.3μsにして撮影した。

3. 実験結果と考察

3.1 圧力とイオン電流の測定

測定位置a (Fig. 2参照)における圧力履歴をFig. 4に示す。点火後8.5msでノッキングに伴う圧力振動が発生し、最大圧力は9MPaに達した。本研究では、圧力とイオン電流の振動波形を明確に捕えるために、Fig. 4に示すような強いノッキングを生じさせた。

次に、同一条件の測定位置Cにおけるイオン電流挙動を示す。Fig. 5は挿入抵抗を500kΩと5kΩ

にして実験した結果である。+出力はイオンプローブの中心電極の極性を+にした場合、-出力は中心電極の極性を-にした場合である。

点火から2ms経過後、火炎がイオンプローブに到達して電流が流れ始めた。中心電極が+の場合には、イオン電流は単調に増加した。しかし、中心電極が-の場合には、いったん流れ始めたイオン電流は0.5ms程度経過すると減少し、その後、わずかに増加した。両者とも点火後8.5msでのノッキングの発生に伴って、電流が急激に増加するとともに高周波が重畳した。

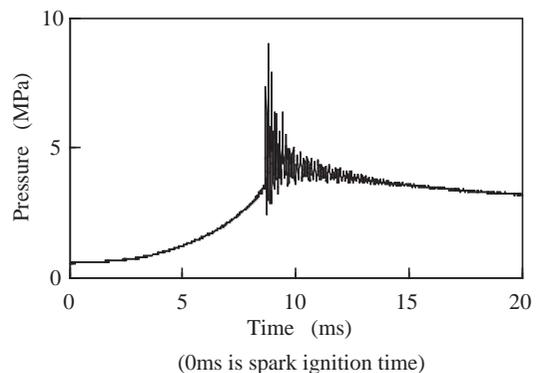


Fig. 4 Pressure behavior after spark ignition.

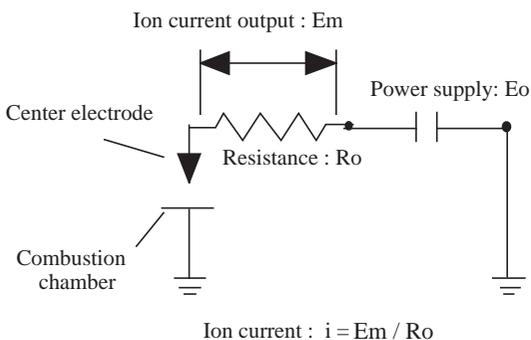


Fig. 3 Measuring circuit of ion current.

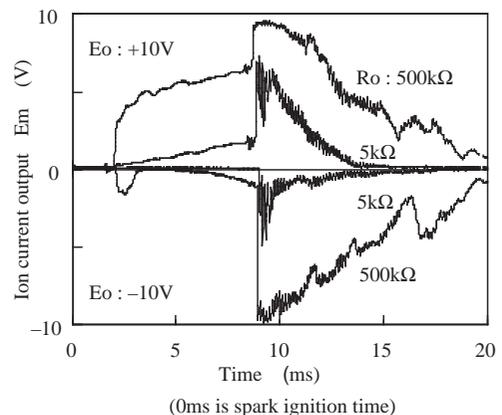


Fig. 5 Ion current behavior after spark ignition.

3.2 ノッキング時の燃焼観察

燃焼状態をシャドウグラフ法で観察した結果を Fig. 6 に示す。火花点火開始の時間を 0ms とし、(a) ~ (d) はノッキング発生前の状況である。火炎面は黒く細い帯状に現れており、その下側が既燃域、その上側が未燃域として明瞭に識別できている。そして、時間経過に伴って火炎が上方に移動する様子がわかる。また、既燃域内に網目状の模様を観察できた。Fig. 6(d) はノッキング発生前約 1ms に相当する写真である。火炎伝播が進行して未燃ガスが燃焼室の端部に残されている状況がわかる。

Fig. 7(a) ~ (d) に自着火発生後のシャドウグラフを示す。ここでは、エンドガス側に設置した測

定位置 a の圧力がノッキングによって急増し始める時間を $0\mu\text{s}$ とした。Fig. 7(a) は $10\mu\text{s}$ での写真である。未燃ガスが最後まで滞在していた領域が白く写っており、その領域で自着火が発生したことを示している。さらに、自着火が発生した領域の直下にも白色部が確認できる。この部位は (b) $30\mu\text{s}$ 、(c) $50\mu\text{s}$ という時間経過に伴って下方に移動し、(d) $70\mu\text{s}$ では燃焼室壁面で反射している。また、移動速度は約 1600m/s に相当することから、この白色の部位はエンドガスの自着火に伴って発生した衝撃波と考えられる。

3.3 自着火発生直後のイオン電流挙動

Fig. 8 は、測定位置 a, b, c の 3 箇所 で自着火発生直後の圧力を測定した結果である。自着火の発

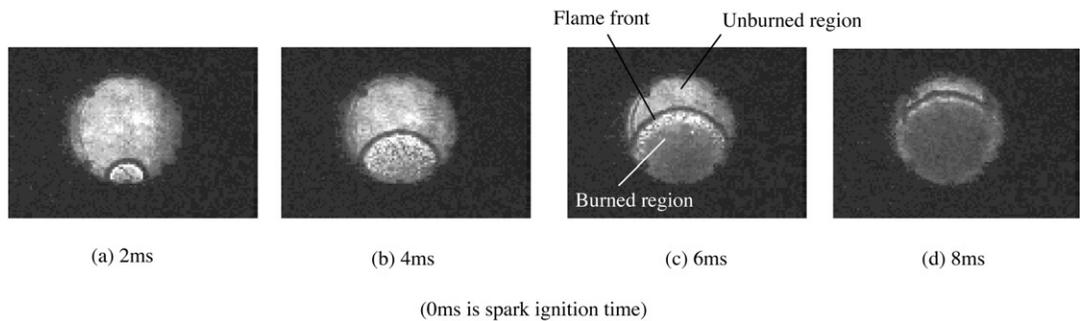


Fig. 6 Shadowgraphs of flame propagation.

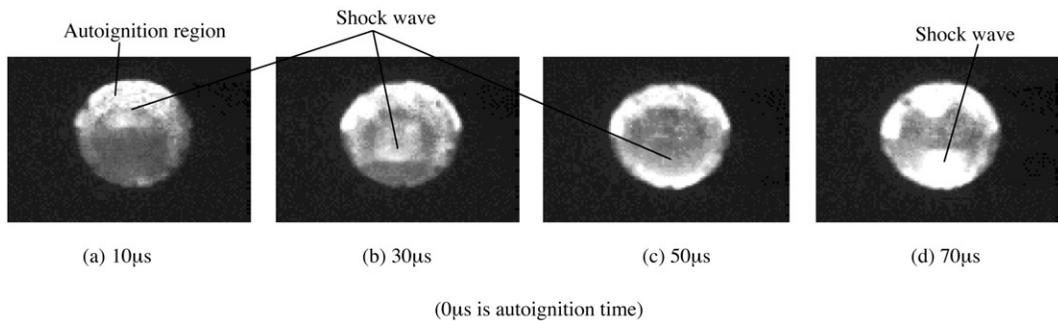


Fig. 7 Shadowgraphs of knocking.

生に伴って測定位置aの圧力増加が始まる時期を $0\mu\text{s}$ とし、その後 $250\mu\text{s}$ までの状況を示した。a, b, cの順で圧力波が伝播し、さらにその圧力波が反射してb, aへと伝わる様子がわかる。その結果、bではaとcの2倍で振動した。

Fig. 9に挿入抵抗を $5\text{k}\Omega$ 、印加電圧を $+10\text{V}$ にして、測定位置A, B, Cの3箇所でのノッキング発生後のイオン電流挙動を測定した結果を示す。ここでは測定位置aでの圧力増加が始まる時期を $0\mu\text{s}$ とした。測定位置aでの圧力が急増する同時期に、

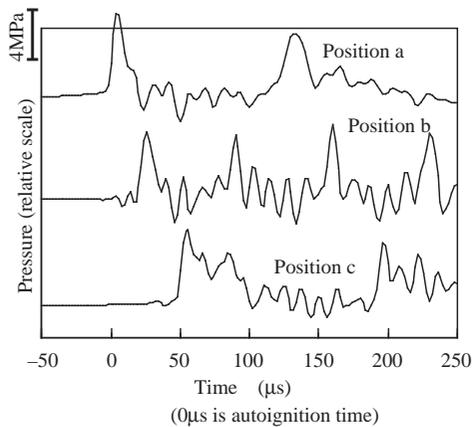


Fig. 8 Pressure behavior after autoignition.

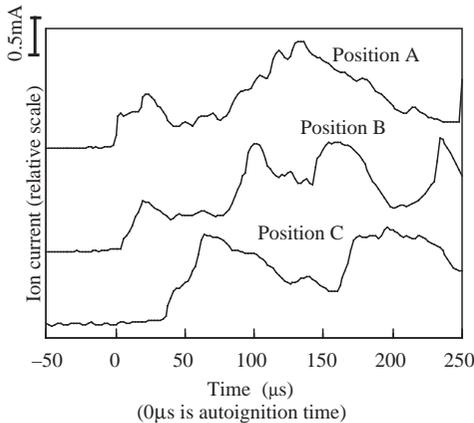


Fig. 9 Ion current behavior after autoignition.

測定位置Aのイオン電流も急増した。その後、 $8\mu\text{s}$ で測定位置Bでのイオン電流が、 $35\mu\text{s}$ で測定位置Cでのイオン電流が増加し始めた。いずれの位置でもイオン電流と圧力の急増する時期はほぼ一致しており、イオン電流が衝撃波の到達に伴って急増することがわかる。さらに、測定位置Cでのイオン電流は $70\mu\text{s}$ で極大値に達した。その後、測定位置Bでは $100\mu\text{s}$ で、測定位置Aでは $140\mu\text{s}$ で2回目の極大値を迎えた。燃焼室中心にある位置Bでは $20\mu\text{s}$, $100\mu\text{s}$, $160\mu\text{s}$, $240\mu\text{s}$ と、ここに示した $250\mu\text{s}$ の間に4回の山が見られた。このように、位置Bでのイオン電流は、圧力と同様に燃焼室端に位置するAとCの2倍で振動した。

一方、圧力挙動とイオン電流挙動が異なる点も認められた。Fig. 8の測定位置aでの圧力が示しているように、衝撃波が通過した後、圧力はノッキング発生前の値に戻った。しかし、イオン電流は、Fig. 9の測定位置Aでの結果が示しているように、衝撃波が通過した後もノッキング発生前の値まで戻らなかった。また、イオン電流振動の半値幅は圧力と比較して大きくなっていった。

3. 4 圧力とイオン電流の周波数特性

ノッキング時にイオン電流が振動する原因を明確にするため、圧力とイオン電流の周波数特性を比較した。イオン電流の振動が圧力波の疎密に起因するものであれば、両者の周波数特性は一致するはずである。

ノッキング発生後の圧力履歴とその周波数特性を示す。Fig. 10は、自着火発生から 2ms までの測定位置bと測定位置cでの圧力履歴である。測定位置bでは測定位置cに比較して振動周期が短く、減衰が早かった。これらの圧力履歴のパワースペクトルをFig. 11に示す。横軸は振動周波数、縦軸は減衰度の相対値を表している。測定位置bでの主振動数は 14kHz であったが、測定位置cでは 7kHz と 14kHz に明確なピークが現れた。 7kHz と 14kHz での振動を燃焼室内のガスの共振という観点で調べると、Fig. 12に示すように、 7kHz での振動は燃焼室を直径方向に2分割した ρ_{10} モードの共振として、 14kHz での振動は燃焼室を同心円状に2分割した ρ_{01} モードとして知られていた¹¹⁾。測定位置cでの圧力振動は、これらの ρ_{10} と ρ_{01} の

振動モードを複合した形で検出しているが、燃焼室中心の測定位置bでは、7kHzでの $\rho 10$ モードが振動の節となるために検出されにくくなるものと考えられる。

次に、Fig. 13に燃焼室中心Bで測定した自着火発生から2msまでのイオン電流挙動を示す。+の電流値はイオンプローブの中心電極の極性を+にした場合、-の電流値はイオンプローブの中心電極の極性を-にした場合である。中心電極の極性

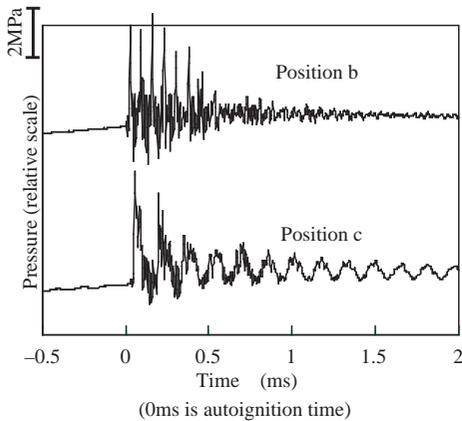


Fig. 10 Pressure behavior on position b and position c.

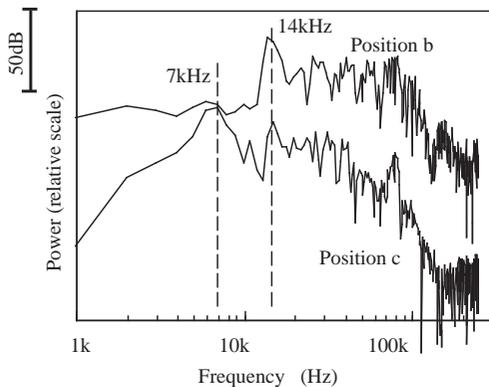


Fig. 11 Power spectrum of pressure on position b and position c.

を+にした場合は、-の場合に比較して電流量が多くなった。これらのイオン電流のパワースペクトルをFig. 14に示す。上方はイオンプローブの中心電極を+にした場合、下方は中心電極を-にした場合の結果である。中心電極を-にした場合には、圧力と同様に14kHzが主振動数になるのに対し、中心電極を+にした場合には、14kHzに加えて7kHzにも明確なピークが現れた。

このようにプローブ極性を変えると、イオン電流振動の周波数特性が変化することがわかった。

3.5 ノッキング時のイオン挙動

前節で述べたプローブ極性の違いによるイオン電流振動の周波数特性の変化を説明するために燃焼室内でのイオンと電子の挙動について考える。イオンプローブの+電極では電子が、-電極では正電荷を持つイオンが捕捉される。また、イオンは電子に比較して移動度が小さいために¹²⁾-電極でイオンを捕捉する領域は、+電極で電子を捕捉する領域より狭くなる。

このようなイオンの挙動に基づき、Fig. 5に示した火炎伝播時のイオン電流挙動を説明すると次のようになる。イオンプローブの中心電極を+にした場合には、燃焼室壁面全体が-電極となる。そのため、イオン密度の高い火炎面がイオンプローブを通過した後も火炎面内のイオンは燃焼室壁面で捕捉されて、電流量は低下しない。一方、中心電極を-にした場合には、イオン密度の高い火炎面がイオンプローブに触れている時には多く

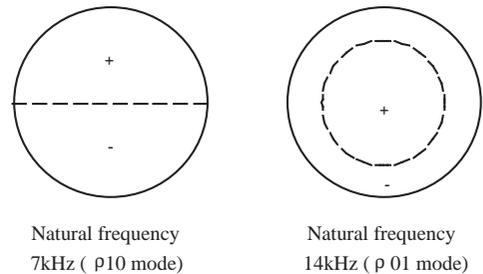


Fig. 12 Natural frequency mode in combustion chamber¹⁰⁾.

のイオン電流が流れる。しかし、火炎面がイオンプローブを通過してしまうと、火炎面内のイオンをプローブで捕捉できなくなるため、電流は急激に減少する。このような火炎伝播時のイオン電流挙動がイオンプローブの極性によって変わる現象は、浜本らの研究¹³⁾でも確認されている。

これらの考え方に基づいて、ノッキング時のイオン挙動を考察する。イオンプローブの中心電極を-にした場合には、イオンは中心電極で捕捉される。その結果、7kHz ($\rho 10$ モード)での振動は節となるために検出されにくくなり、圧力センサ

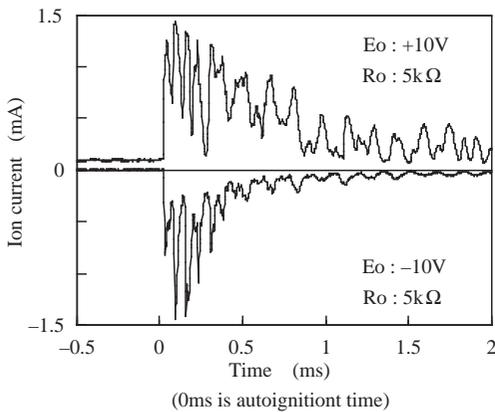


Fig. 13 Ion current behavior on position B.

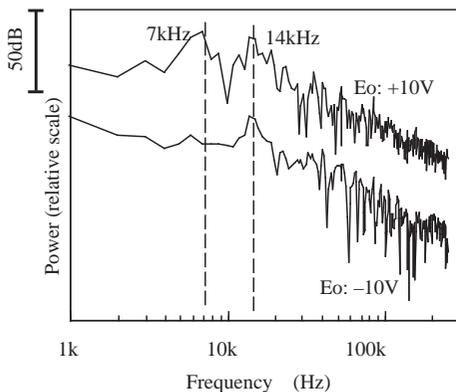


Fig. 14 Power spectrum of ion current on position B.

と同様に、固有振動数が14kHz ($\rho 01$ モード)の振動を強く捕える。この場合、イオンプローブは燃焼室内の局所情報を検出していることになる。

一方、中心電極を+にした場合には、イオンは-電極となっている燃焼室全体で捕捉されるため、イオンプローブは燃焼室内の複数の振動モードを複合した形で捕える。測定位置AとCでの振動は位相が反転するものの、その振幅が異なるために打ち消し合うことはない。その結果、 $\rho 10$ モードと $\rho 01$ モードの両者を捕えて、7kHzと14kHzに明確なピークが現れる。この場合、イオンプローブは燃焼室全体の情報を検出するため、圧力センサとは異なった振動モードを捕えることになる。

このように、イオンプローブの中心電極を+にすると圧力の周波数特性とは異なった特性が得られるが、これはプローブ極性によりイオンの捕捉範囲が変わるために生じる現象として説明できる。

4. まとめ

ノッキング発生時のイオン電流挙動を燃焼観察の結果ならびに圧力挙動と比較することにより下記の知見を得た。

(1) ノッキングにより発生した衝撃波がイオンプローブに到達すると、イオン電流は急増し、圧力波と同様な高周波成分が重畳した。

(2) ノッキング発生時のイオン電流振動と圧力振動のパワースペクトルを比較すると、イオンプローブの中心電極を-にした場合には、圧力と同様に14kHzが主振動数になるのに対し、中心電極を+にした場合は、圧力特性とは異なって、14kHzに加えて7kHzにも明確なピークが現れた。これは、イオンプローブの極性によりイオンを捕捉する領域が異なるために生じる現象として説明することができた。

上記の結果から、ノッキング時のイオン電流は圧力波の疎密に伴ってイオン密度が変化するために振動していると結論づけることができた。

参考文献

- 1) 金栄吉: "自動車用ガソリン機関の燃焼状態と火炎の電気伝導度", 日本機械学会論文集(第2部), 33-252(1967),

1278 ~ 1287

- 2) 西澤透, 清水智広, 吉田幸司, 庄司秀夫, 斎間厚: "火花点火機関の末端ガスの発光強度と吸光度の同時測定", 第13回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1996), 347 ~ 352
- 3) 河合英直, 廣瀬孝行, 三宅周三, 千田二郎, 藤本元: "火花点火機関における自着火発生前反応の挙動", 自動車技術会論文集, 29-3(1998), 11 ~ 16
- 4) Anson, L., Pyko, J. S.: "Engine Misfire Detection by Ionization Current Monitoring", SAE Tech. Pap. Ser., No.950003,(1995)
- 5) 中田浩一, 茂木和久: "イオン電流による燃焼状態検出の検討", 自動車技術会学術講演前刷集, 974(1997), 9 ~ 12
- 6) 飯田隆弘, 浅野守人, 梶谷満信, 九間哲雄, 森永幸希: "イオン電流を用いた燃焼制御システムの開発", 自動車技術会学術講演前刷集, 975(1997), 13 ~ 16
- 7) 寺田耕: "イオン電流を応用した点火と燃焼に関する測定方法", 内燃機関, 17-212(1978), 64 ~ 72
- 8) Auzins, J., Johansson, H., Nytomt, J.: "Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock and Engine Control", SAE Tech. Pap. Ser., No.950004,(1995)
- 9) 木下雅夫, 斎藤昭則, 茂木和久, 中田浩一: "ノッキング発生時のイオン電流と筒内圧力の挙動解析", 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.2-99(1999), 5 ~ 8
- 10) Hayashi, T., Taki, M., Kojima, S., Kondo, T.: "Photographic Observation of Knock with a Rapid Compression and Expansion Machine", SAE Tech. Pap. Ser., No.841336,(1984)
- 11) Draper, C.: "Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine", J. Aeronaut. Sci., 5-6 (1938), 219 ~ 226
- 12) Gaydon, A. G., Wolfhard, H. G.: Flames, (1978), 340 ~ 371, Chapman and Hall
- 13) 浜本嘉輔, 吉山定見, 富田栄二, 平田則彦, 上田敦: "点火電極イオンプローブによる燃焼診断", 日本機械学会論文集(B編), 60-572(1994), 388 ~ 394

(2000年4月11日原稿受付)

 著者紹介



木下雅夫 Masao Kinoshita

生年: 1956年。

所属: エンジン機能制御研究室。

分野: ガソリンエンジンの燃料供給系および燃焼系の研究・開発。

学会等: 日本機械学会, 日本トライボロジー学会, 自動車技術会会員。
工学博士。

斎藤昭則 Akinori Saito

生年: 1948年。

所属: エンジン機能制御研究室。

分野: エンジンの燃料噴射系および直噴ガソリンエンジンなどの研究・開発。

学会等: 日本機械学会, 自動車技術会, 日本液体微粒化学会会員。
工学博士。

1988年 ICLASS Tanasawa Award 受賞。

1994年 自動車技術会論文賞受賞。

1996年 SAE Award for Research on Automotive Lubricants 受賞。

1997年 自動車技術会技術開発賞受賞。

1999年 日本機械学会技術業績賞受賞。



茂木和久 Kazuhisa Mogi

生年: 1955年。

所属: トヨタ自動車(株)第2エンジン技術部エンジン開発室。

分野: ガソリンエンジンの点火, 燃焼, 制御システムの開発。

学会等: 自動車技術会会員。



中田浩一 Koichi Nakata

生年: 1966年。

所属: トヨタ自動車(株)第2エンジン技術部エンジン開発室。

分野: ガソリンエンジンの点火, 燃焼, 制御システムの開発。

学会等: 自動車技術会会員。