

イオン電流計測を用いたフォーミュラ1エンジンの 燃焼状態検出システムの研究

Study on Combustion Monitoring System for Formula One Engines Using Ionic Current Measurement

島崎 勇一*
Yuichi SHIMASAKI
鈴木 宏章*
Hiroaki SUZUKI

坂口 純子*
Junko SAKAGUCHI
加藤 彰*
Akira KATO

牧 秀隆*
Hidetaka MAKI
西澤 一俊*
Kazutoshi NISHIZAWA

要 旨

フォーミュラ1エンジンの故障診断や燃焼制御のためにイオン電流計測を用いた燃焼状態検出システムを構築した。

本システムは、新たなセンサを付加する必要がないように、スパークプラグ中心電極をイオンプローブとして用いイオン電流計測を行うもので、常時オンボードで全運転領域の燃焼状態を気筒ごとにモニタリングすることができるものである。現在、この技術は精度や信頼性が高いため、フォーミュラ1などのエンジン制御やテレメトリーシステムによるピットへの情報供給に有効に活用されている。その制御内容は、失火検出、ヘジテーション検出、デトネーション検出、リーンバーンなどである。

また、スパークプラグ中心電極形状とイオン電流の絶対量の関係についても報告する。

ABSTRACT

A combustion monitoring system has been developed by applying ionic current measurement for malfunction diagnosis and combustion management of Formula One engines. In this system the spark plug's center electrode acts as an ion probe for ionic current measurement, which eliminates the need for additional sensors. The system allows the onboard monitoring of each of the cylinders for their combustion status under all operational conditions. The accuracy and reliability has ensured that the technology can be effectively used for the management of Formula One engines with car-to-pit communication carried out via telemetering. It is capable of various types of controls including detection of misfire, hesitation, detonation and the lean-burn condition. In addition to these points, this paper reports on the relationship between the spark plug center electrode configuration and the absolute quantity of ionic current.

1. まえがき

近年の乗用車は、故障車両から排出される多量の有害排出ガスによる大気汚染を避けるため、車載故障診断装置(以下、OBD システム: On Board Diagnosis System)を装着している。その中には、高回転高出力エンジン用としてイオン電流計測から失火を検出するものも採用されている。Fig. 1 に、イオン電流失火検出システム採用車を示す。

他方、フォーミュラ1用エンジンは、回転レンジが広いことに加え高出力を得るために大きなシリンダボア径を採用している。そのため広い運転領域の燃焼を安定化させることは難しかった。また、万が一故障が発生した場合、限られた時間内に故障の原因と個所を精度良く特定し、対応す

ることが求められていた。

本論文は、上記課題を克服するため、量産車で培ったイオン電流計測技術をフォーミュラ1エンジン用に改良し有効に活用した内容を報告する。



Fig. 1 Vehicle with ionic current measuring system

*栃木研究所

2. イオン発生メカニズムと計測原理

燃焼の過程でイオンが発生することは、古くから良く知られている。また、イオン電流は、以下の2種類のイオン発生過程を経て検出されると考えられ、イオン電流波形には二つのピークが発生する (Fig. 2)。

- (1) 燃焼初期の火炎面が電極を通過する際に発生する比較的長寿命の $C_3H_3^+$ 等のイオンを検出する。
- (2) 2000K以上の燃焼ガス中において、 N_2 が熱解離し NO^{2+} イオンとなりこれを検出する。

次に、イオン電流計測の原理を示す (Fig. 3)。燃焼室に配置したイオンプローブに300V程度のプラス電位を印加し、燃焼により発生した $C_3H_3^+$ 、 CHO^+ 、 NO^{2+} 等のイオンを捕捉する。スパークプラグ中心電極をイオンプローブとして用い、点火コイルのエネルギーをコンデンサに蓄え電源として使う構成が簡単で一般的である。しかしこの場合、放電中の計測はできず、誘導放電の時間が1 msec程度と長いフルトランジスタ点火方式では、燃焼期間に誘導放電が重なり計測精度が低下する問題点を持っている。しかしながら、Honda フォーミュラ1エンジンは、放電時間が70 μ sec程度と短い CDI 点火システム (Condenser Discharge Ignition System) を用いているため、燃焼期間の大半をモニタすることができる。

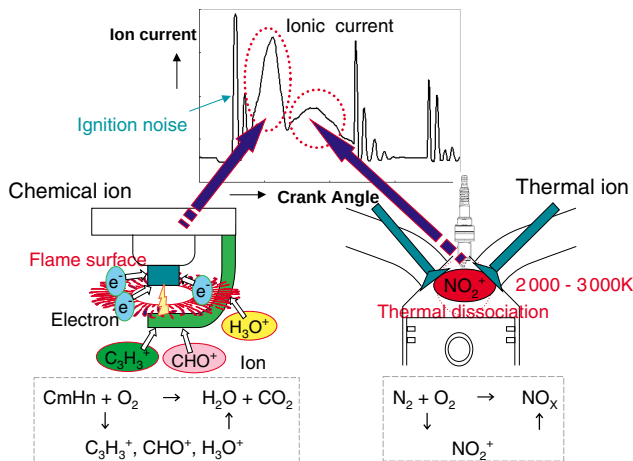


Fig. 2 Mechanisms of ionic current generation

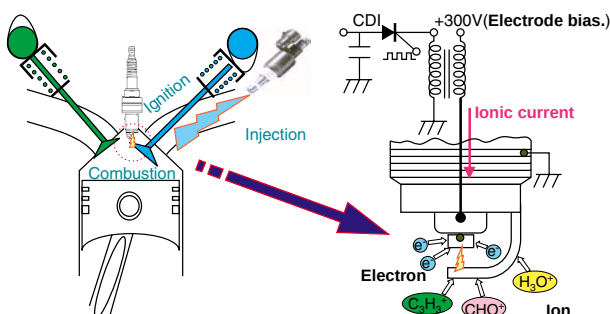


Fig. 3 Principle of ionic current measurement

3. システムの構成

CDI 点火方式では、大型コンデンサに蓄えられたエネルギーがサイリスタにより1次コイルに流され、2次コイルに高電圧が発生する。このイオン電流検出システムでは、点火によりグラウンドに流れるエネルギーの一部を300Vのツェナダイオードにより制限し、MDSユニット (Misfire Detection System Unit) のコンデンサに蓄えるようにした。その300Vで蓄えられたエネルギーを利用し、放電終了後スパークプラグ中心電極にプラスのバイアス電圧を印加するように設計した。プラス電圧を印可した理由は、電荷あたりの質量が大きく、電界を与えた時の移動量が小さい陽イオンより電子を捕らえた方がより多くのイオン電流を検出できると考えたためである。Fig. 4にバイアス電圧の方向とイオン電流検出量の関係⁽¹⁾を示すが、陽イオンを表面積が大きい燃焼室で捕捉し、電子は表面積が小さい中心電極で捕らえるようにした方が多量のイオン電流を検出することが確認できる。その結果としてシステムの S/N (Signal Noise Ratio) が向上し、検出の精度を高めることができた。

イオン電流は、検出抵抗 (シャント) により電圧値として検出し、積分用オペアンプとリセット用オペアンプを経て、デジタル化される。この信号は、PWM (Pulse Width Modulation)、または、高速シリアル通信により ECU (Engine Control Unit) へ送られ、そこからエンジン制御やテレメトリシステムによるピットへの情報供給に使われる。Fig. 5に、イオン電流計測システムの構成を示す。

MDSユニットはコンパクトな形状とし、ケースは、軽量化のためマグネシウム合金を用いている。また、電源と入出力用に2個の Deutsche Auto Sport 社製コネクタを使用し信頼性確保に努めている。Fig. 6に、MDSユニットを示す。

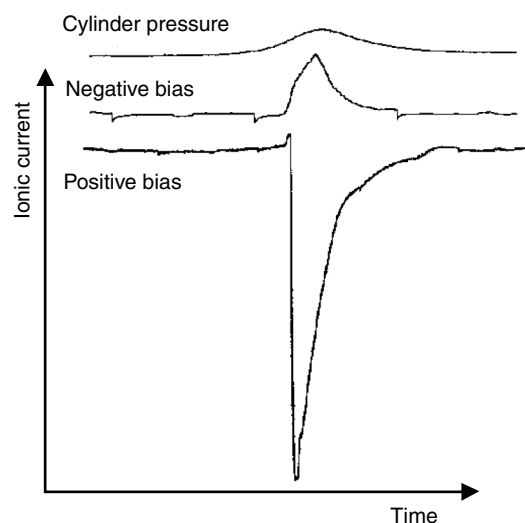


Fig. 4 Relationship between direction of bias voltage and amount of ionic current

点火コイルは、従来 CDI の入力とグランドの 2 ピン構成からイオン電流計測のための出力端を追加し、3 ピン構成とした。また、CDI 点火のため 1 次、2 次コイル共にターン数は少なく、インダクタンスを低く抑えているため、誘導放電時間は極めて短い $70 \mu\text{sec}$ 程度となっている。Fig. 7 に、イオン電流計測用点火コイルを示す。

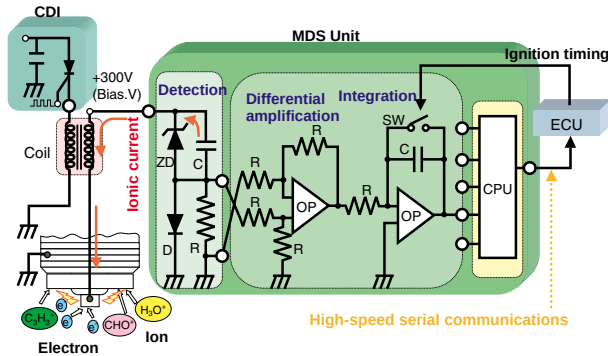


Fig. 5 Configuration of ionic current measuring system

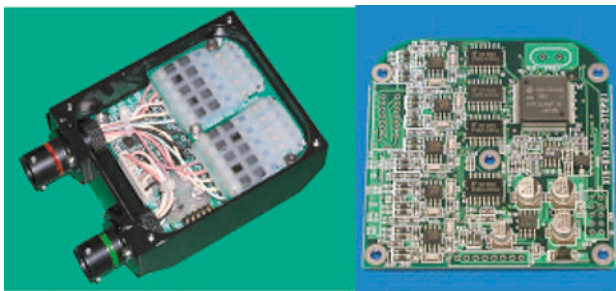


Fig. 6 MDS unit



Fig. 7 Ignition coil for ionic current measurement



Fig. 8 Example of system installation

MDS ユニットの、車体側面 ECU の近傍に配置されている。また、ハーネスの浮遊容量の影響を最小限にするために、回路でのノイズ対策を行ないシールド線は廃止した。Fig. 8 に、車輛搭載例を示す。

4. 失火検出システム

故障診断システムは、失火だけではなく他のセンサ故障などと協調して故障を判断し、故障部品の特定や頻度の測定を行ない、総合的に故障状態を詳細に把握できるようにした (Fig. 9)。

また、失火検出のフローは、ゲート区間のイオン電流をアナログ積分し、所定いき値より低い場合、失火と判断し、これが所定の頻度で発生した場合、故障と判断している。なお、ゲート区間は、放電期間とその後の点火コイル内の電気的な振動ノイズを排除するために設けている (Fig. 10, 11)。

Fig. 12 は、失火有無によるイオン電流発生状況である。これより見て取れるように失火時は、燃焼によるイオンの発生がないため、イオン電流の積分値は低く、それと対比して正常燃焼では、イオンが多量に発生し、積分値が増加す

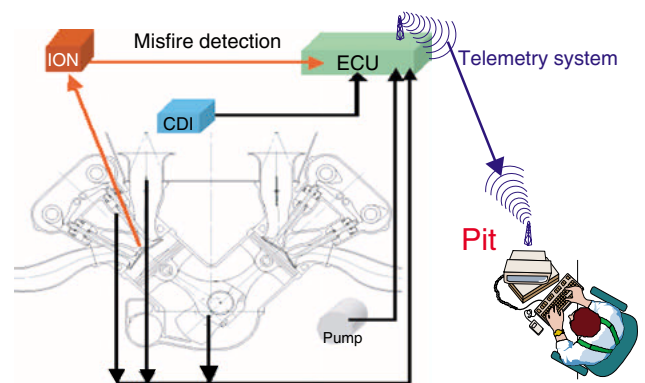


Fig. 9 Diagnosis system configuration

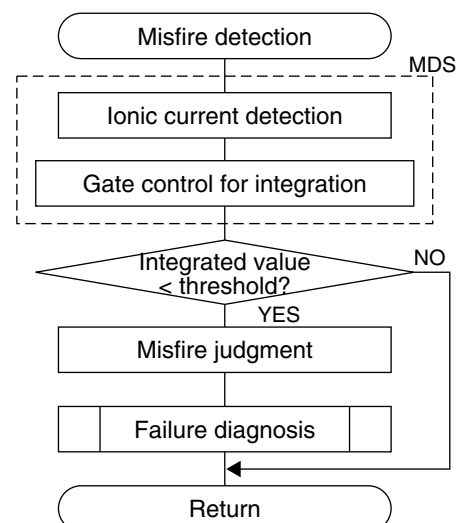


Fig. 10 Misfire detection flowchart

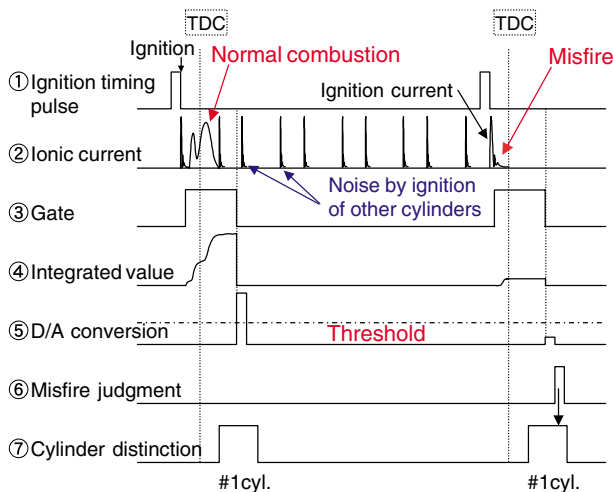


Fig. 11 Timing chart

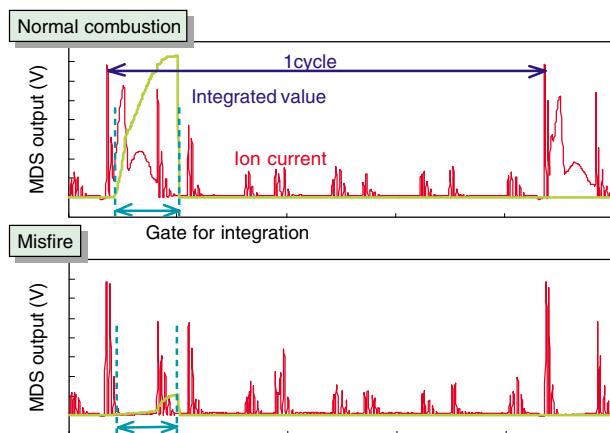


Fig. 12 Test results under misfire and normal combustion

る。この差は明確であり、十分なS/Nが得られることが判断できる。意図的に燃料供給を停止して行なった実車テストでも同様に、失火が検出でき、所定頻度で故障フラグが立つことが確認できた(Fig. 13)。

5. リーンバーン制御

5.1. リーン燃焼時のイオン電流

空燃比とイオン電流の関係を明らかにするため、UEGO センサ(Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor)を用いて空燃比を計測しイオン電流との相関を確認した。一般に、空燃比をリーン化することで燃費向上を図ることができる。しかし、リーン限界を越えると失火頻度が増加し、燃費は逆に悪化する(Fig. 14)。

また、空燃比とイオン電流量には相関があり、リーン燃焼時はイオン電流の発生が少ないことが確認できる(Fig. 15)。

気筒間の空燃比とイオン電流の関係をみると空燃比がリッチでIMEP(Indicated Mean Effect Pressure)が高いであろう気筒は、イオン電流量が大きいことが確認でき、これを利用して気筒間の簡易的な空燃比検出も可能性があることも分る(Fig. 16)。

5.2. ヘジテーション検出

燃費向上のために空燃比を希薄な状態で運転した場合、加速時にヘジテーションが起こり易く、コーナ出口の立上りなどで加速性能が損なわれる。この現象を改善するためにイオン電流計測システムを応用した。ヘジテーションの原因は、急激な吸入空気量増加により、可燃限界以下に混合気がリーン化し、失火もしくは失火に近い IMEP となるた

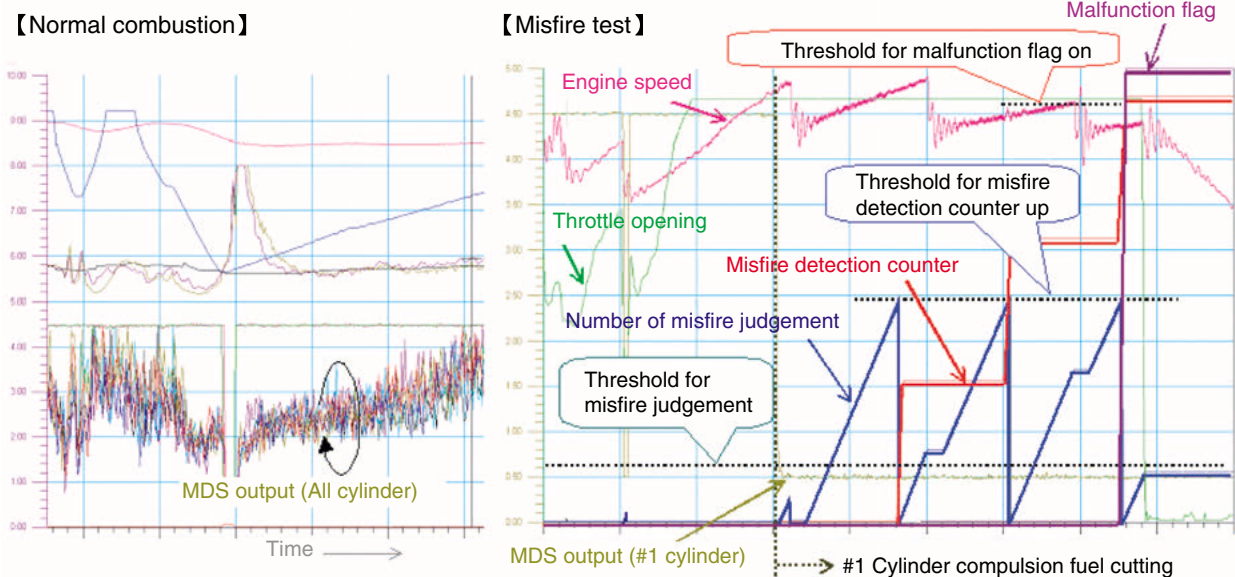


Fig. 13 Test results with actual vehicle

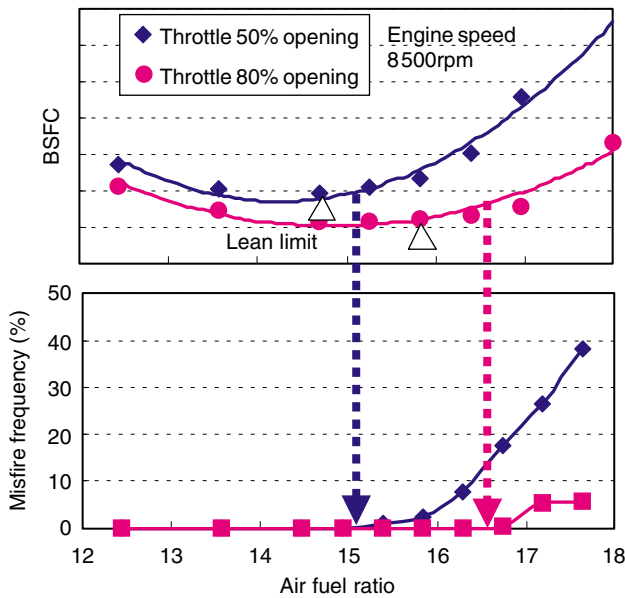


Fig. 14 Lean limit and frequency of misfire

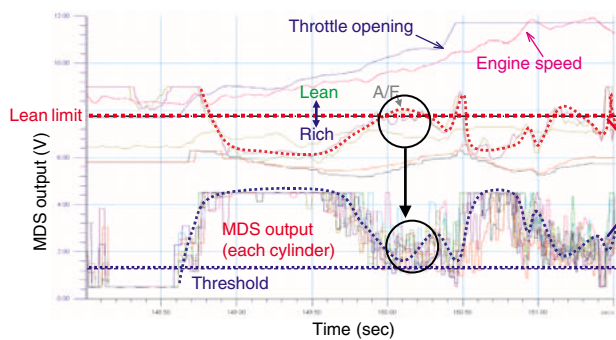


Fig. 15 Lean-burn test with actual vehicle

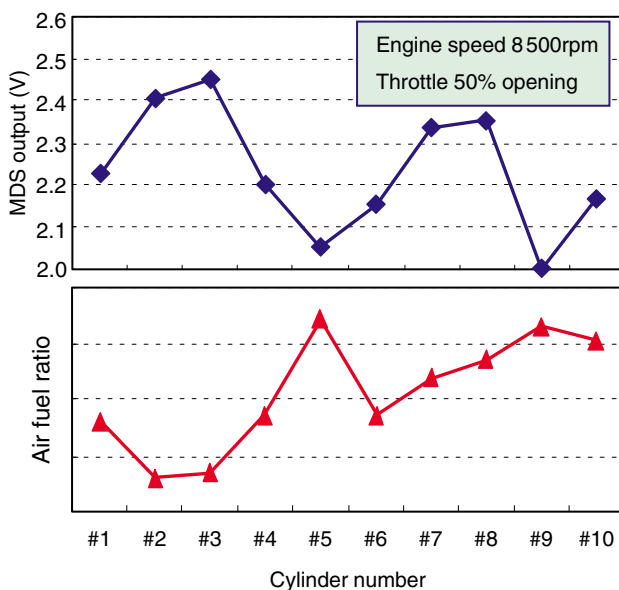


Fig. 16 Cylinder-to-cylinder variations of air-fuel ratio and ionic current generation

めである。したがって、リーン化により、イオン電流量は減少し、ヘジテーションの時間は長くなる。このシステムは、加速時のこのような現象に着目して検出するものである。

Fig. 17 に、システムのフローチャートを、Fig. 18 にベンチテスト結果を、Fig. 19 に実車でのテスト結果を示す。

システムのフローは、イオン電流が所定いき値より低い時間を計測し、所定時間以上に長い場合、オーバーリーンと判断し、空燃比をリッチ化する。逆に、その時間が所定値より短い場合、よりリーン化が可能で、燃費向上のためリーン化する。

Fig. 18, 19 に示すように、空燃比をリーン化した場合、顕著にヘジテーションの継続時間は長くなることが確認で

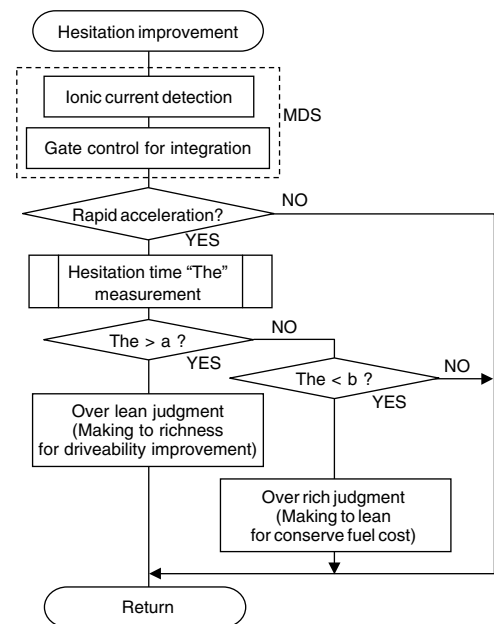


Fig. 17 System flow chart for Hesitation control

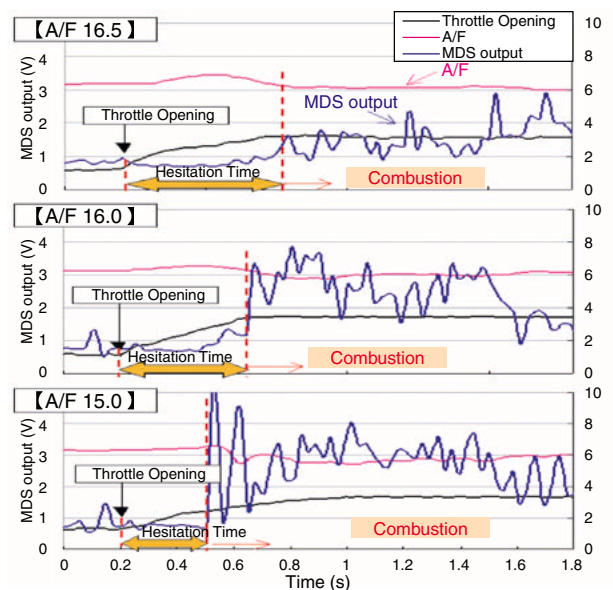


Fig. 18 Dynamometer measurement result about lean-burn condition

ける。また、UEGO センサ信号を見ると、ストイキオメトリックに近い空燃比では、加速時一旦リーン化するものの、その後空燃比はリッチ化し加速を助けていることが分る。しかし、リーン限界に近い領域では、この現象は見られず、加速増量の効果がないため、顕著なヘジテーションが発生し、場合によっては3倍程度その時間は増大する。

6. デトネーション検出

リーン混合気下で高回転高負荷運転を行なった場合、ノックやプリイグニッションなどのデトネーションが起こることは良く知られている。

Fig. 20 に、熱面着火によるデトネーション発生例を示す。図上段、中段は、実際のレースで発生したもので、下段

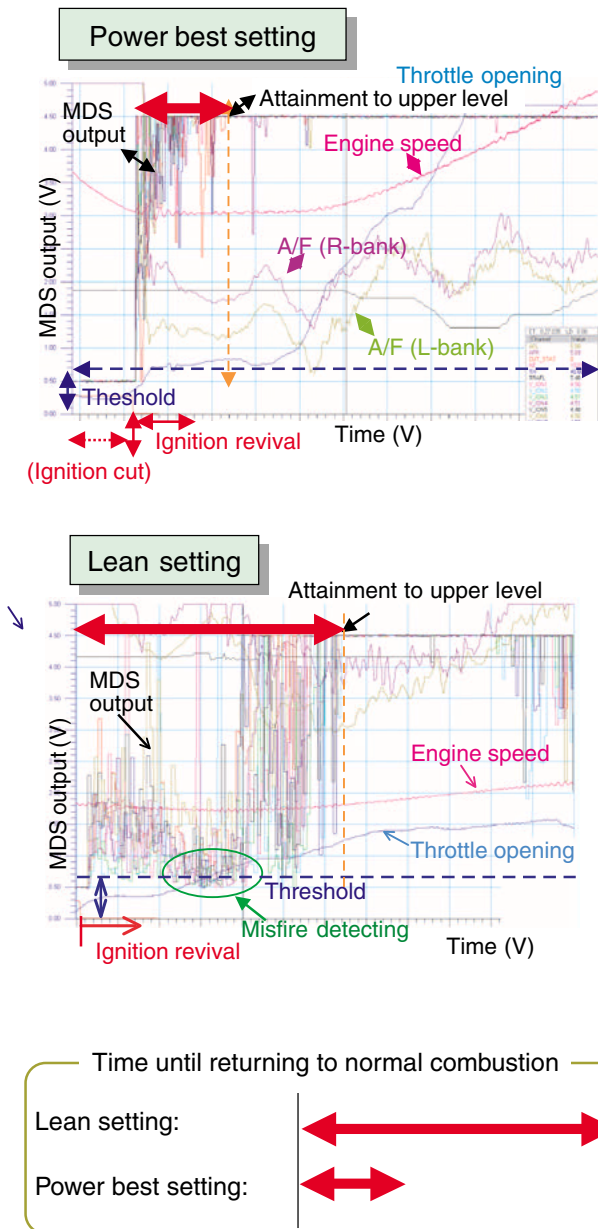


Fig. 19 Actual vehicle measurement result about lean-burn condition

はその再現テストで発生したものである。ピストンだけでなく燃焼室まで熔損している。再現テストでは、リーン混合気下で点火時期を進角して、同様の破損を再現した。Fig. 21 に、デトネーション再現テスト時のイオン電流波形を示す。

事前テストで点火時期を進角してもノックは発生しないことを確認しテストは行なった。イオンは点火直後から急激かつ多量に発生し、計測の上限になっていることが確認できる。また、同じ条件下であっても時間の経過により、燃焼室壁面が高温になりデトネーションが発生することを示している。点火直後に通常の着火遅れを伴わず、イオンは発生し、筒内圧ピーク近傍で燃焼は高温となり、熱解離により多量のイオンが発生している。この現象はプリイグニッションと同じ熱面着火と考えられるが、点火の前にはイオンの発生が無いいため、熱面着火によるポストイグニッション現象であると判断している。

7. イオン電流量

7.1. スパークプラグ中心電極形状とイオン電流量

例え燃焼により発生するイオンの量が同一であっても、イオン電流を計測する能力によりイオン電流の量は変化する。このイオン電流計測システムでは、スパークプラグ中

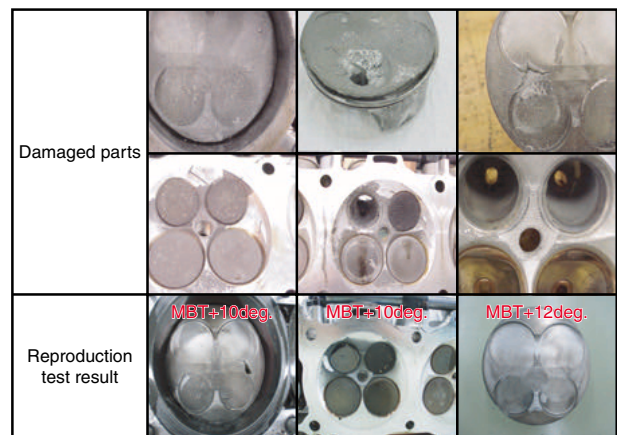


Fig. 20 Detonation caused by hot surface ignition

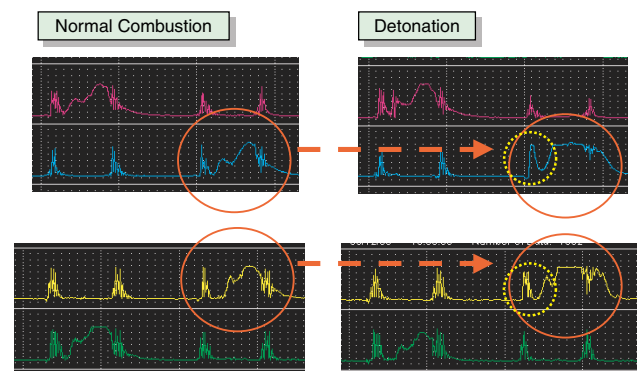


Fig. 21 Amount of ionic current during reproduction test

心電極はセンサであり、アンテナの役割をしている。したがって、計測されるイオン電流量は、アンテナの能力に影響される。

Fig. 22, 23に、スパークプラグ中心電極形状とイオン電流計測量の関係、スパークプラグ中心電極形状と気筒間のイオン電流量を示す。中心電極の表面積を横軸に、イオン電流量を縦軸に整理すると、同じ形状のスパークプラグの場合、その表面積とイオン電流の関係はほぼ線形な関係で表

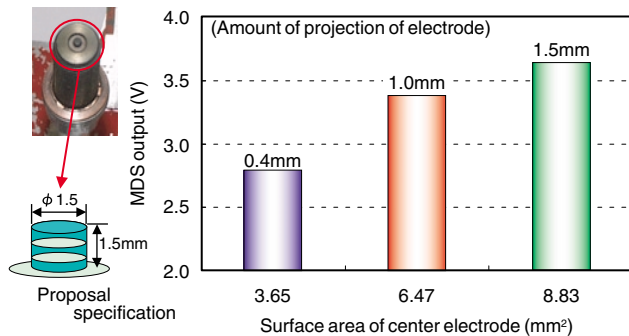


Fig. 22 Relationship between spark plug center electrode configuration and ionic current generation (detectable)

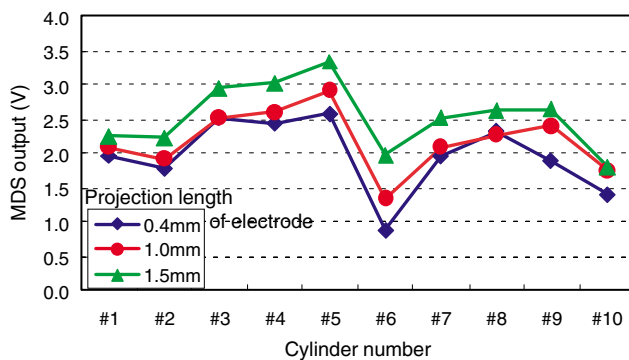


Fig. 23 Relationship between configuration of spark plug center electrode and cylinder-to-cylinder ionic current generation

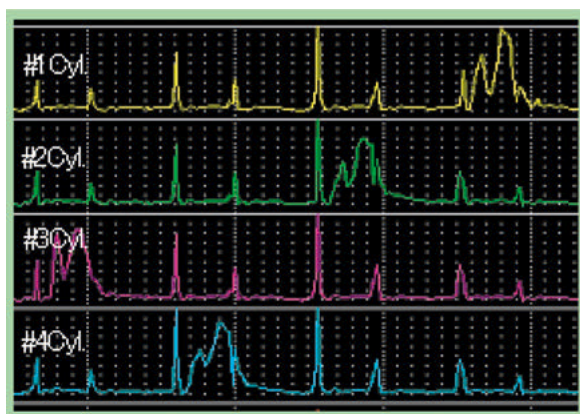


Fig. 24 Ionic current waveform measured with spark plug electrode protruding by 1.5mm

面積に比例して大きくなる。同様に気筒間のイオン電流量を比較するとそれぞれの気筒で同じ比率の変化をする。

Fig. 24 に、スパークプラグ中心電極突出し量 1.5mm のイオン電流波形を、Fig. 25 に、実車テストでのスパークプラグ中心電極突出し量とイオン電流の関係を示す。突出し量が 1.5mm と十分大きな場合、イオン電流波形は大きく、高い検出性を持っていることが確認できる。また、実車テストでは、中心電極突出し量により得られる出力が大きく変化することが確認できた。

7.2. 検出できたイオン電流量

中心電極表面積が 3.65mm^2 (0.4mm) のスパークプラグを使用した場合、検出抵抗 R を $18\text{k}\Omega$ に設定すると、ケミカルイオンがピーク時、その抵抗の両端にかかる電圧は、19V であった。その時のイオン電流量は式(1)に示すように 1.06mA である。また、イオン電荷の積算量は、式(2)で表すことができ、式(3)、(4)のように算出すると 15000rpm 時のケミカルイオンとサーマルイオンの積算量は、いずれも $0.19\mu\text{C}$ であった。したがって、Fig. 22 から分るように中心電極の表面積が増加するとイオン電流の捕捉量は一次関数で増加していくことが推測できる。Fig. 26 に、ケミカルイオンが最大の時のイオン電流量を、Fig. 27 に、検出した電荷量を示す。

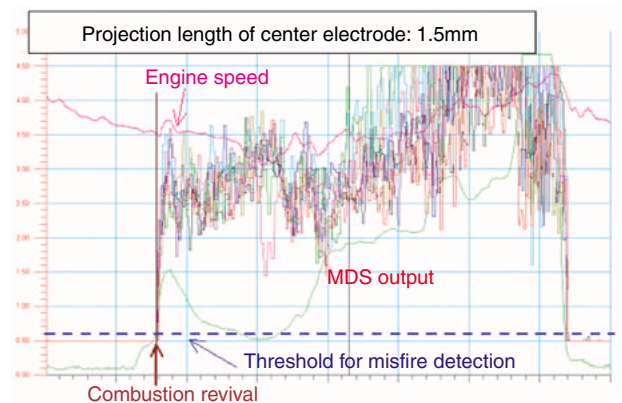
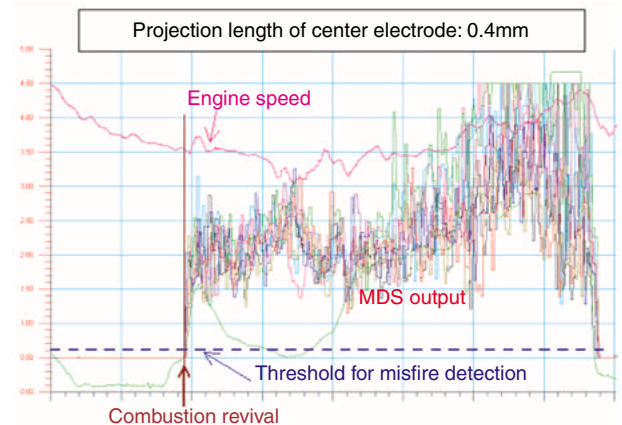


Fig. 25 Actual test results with different protrusions of sparkplug center electrode

$$I = \frac{V}{R} = \frac{19}{1.8 \times 10^4} = 1.06 \text{mA} \quad (1)$$

$$Q = \int Idt \quad (2)$$

$$Q_{\text{chemical}} = 0.19 \mu\text{C} \quad (3)$$

$$Q_{\text{thermal}} = 0.19 \mu\text{C} \quad (4)$$

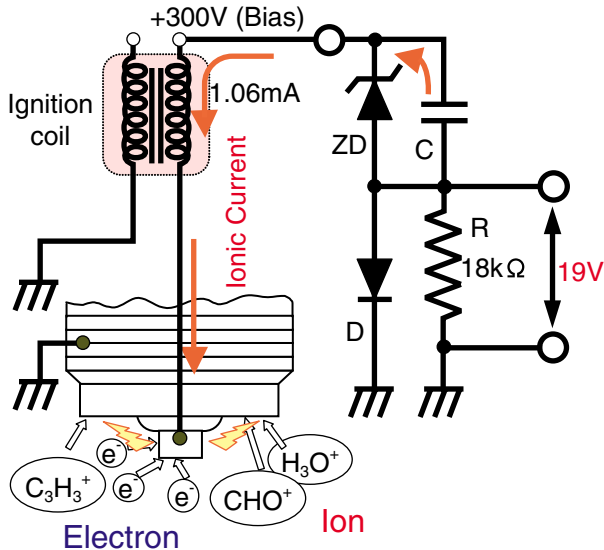


Fig. 26 Amount of ionic current at chemical ion generation peak

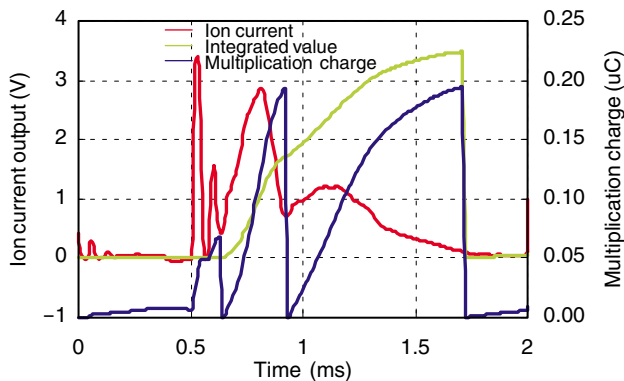


Fig. 27 Detected electric charge

8. まとめ

フォーミュラ1エンジンにイオン電流計測を用いた燃焼状態検出システムを採用し、以下の知見を得た。

- (1) スパークプラグ中心電極をイオンプローブとして使い、放電時のエネルギーをコンデンサに蓄えバイアス用電源として用いるこのイオン電流計測システムは、放電

時間が短いCDI点火システムとあいまって全運転領域で良好な計測精度が得られた。また、このイオン電流計測を用いた失火検出システムは、点火ノイズを除外するゲート手段と積分手段、失火頻度計測手段により故障を診断するもので、全運転領域で十分高い検出精度を持っていることが分った。

- (2) リーン燃焼時イオン電流量は減少する。これを利用し失火や IMEP 低下をイオン電流より検出することでリーンバーン燃焼を制御することができ、また、気筒間の空燃比較差を簡易的に検出することも可能である。
- (3) 過渡時空燃比のオーバーリーンによる IMEP 低下(ヘジテーション)は、イオン電流の低下している時間を計測することで検出することができ、空燃比のセッティングツールやエンジン制御に応用することが可能である。
- (4) イオン電流を計測することで高負荷時発生する熱面着火などのデトネーションを検出することができる。また、エンジンが破損するような熱面着火が発生した場合、着火遅れはなくなり、火炎面は早期に伝播することが分った。さらに、筒内圧ピーク近傍のタイミングでは、高温燃焼による N_2 熱解離により極めて多量のサーマルイオンが発生することも確認できた。
- (5) スパークプラグ中心電極は、イオン電流を検出するアンテナの役割を果たし、表面積とイオン電流検出量は、同じような形状の場合、1次の比例関係にある。したがって、中心電極が大きく突出した形状のものは検出感度が高いことが分った。
- (6) スパークプラグをイオンプローブとして使い、300Vのバイアスを印加したこのシステムで 15 000rpm 時に計測できるイオン電流量は、ピーク電流でも 1.06mA 程度の微弱なものであった。また、その時のケミカルイオン、サーマルイオンの総量は同量でそれぞれ $0.19 \mu\text{C}$ であった。

本研究で開発したイオン電流計測を用いたシステムは、現状のフォーミュラ1エンジンやその他のレース用エンジンに有効に活用され、故障診断やデータロギングに必要な不可欠なものとなっている。今後、燃焼状態をより詳細に検出しエンジンを制御することが必要な時代が訪れると思うが、このイオン電流検出システムは、その先鞭として十分ふさわしい能力を持ち、新しい価値を創出することができたと確信している。

謝 辞

本研究にあたり、共同研究者として貴重なベンチテストの結果を残してくれた故中島 健次さんに感謝し、ご冥福をお祈り致します。

また、ご協力頂きました日本特殊陶業(株)近藤 稔明様、山田 達範様には、紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

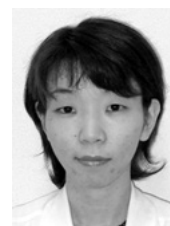
参考文献

- (1) Shimasaki, Y., et al.: Spark Plug Voltage Analysis for Monitoring Combustion in an Internal Combustion Engine, SAE 930461
- (2) Miyata, S., et al.: Flame Ion Density Measurement Using Spark Plug Voltage Analysis, SAE 930462
- (3) Shimasaki, Y., et al.: Study on Combustion Monitoring System for Formula One Engines Using Ionic Current Measurement, SAE 2004-01-1921
- (4) 島崎 勇一ほか：フォーミュラ1エンジンの燃焼状態検出システムの研究(第1報)，自動車技術会，学術講演会前刷集 No.107-04, p175

■ 著 者 ■



島崎 勇一



坂口 純子



牧 秀隆



鈴木 宏章



加藤 彰



西澤 一俊