

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04337

研究課題名(和文) ノッキングを精密計測するための超高密度マルチイオンプローブの開発

研究課題名(英文) Development of ultra-high density multiple-ion probe for precise measurement of knocking

研究代表者

八房 智顯 (Yatsufusa, Tomoaki)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：50346524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で提案するマルチイオンプローブ計測法は、従来の計測方法と併用可能な新たな計測方法であり、計測手法の最大性能の確認、エンジンに適用した場合の取得データの解析方法の確立、計測データの特性などを調査した。

2ストロークガソリンエンジンを計測対象としたマルチイオンプローブ計測による取得データから、エンジン内を伝播する火炎面の動的挙動を再構成することができた。また、サイクル毎に変動する伝播状態を統計的に評価するため、再構成した火炎面から複数個の特徴量を考案・抽出し、サイクル変動に伴うエンジン加速度等に対して比較した。これにより燃焼状態を判断することができる特徴量を見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガソリンエンジンを含む自動車用内燃機関はCO2排出量低減を目指して熱効率向上を図るべく開発が進められている。熱効率向上には圧縮比の増加が有効であるが、ガソリンエンジンにおける圧縮比の向上にはノッキングを含む異常燃焼の発生のため、圧縮比の向上が阻まれている。異常燃焼を回避しながら圧縮比を向上させるためには、異常燃焼の現象把握が重要である。本研究で提案するマルチイオンプローブ計測法は、エンジン内のノッキング等異常燃焼を詳細に把握することが可能で、ガソリンエンジンの圧縮比向上による燃費の改善につながることもできる新たな燃焼計測方法となる。

研究成果の概要(英文)：The multiple-ion probe measurement method proposed in this study is a new measurement method that can be used together with conventional measurement methods such as visualization and pressure measurement. The maximum performance of the measurement method was confirmed, a method for analyzing the acquired data of engine measurements was established, and the characteristics of the measurement data were investigated.

The dynamic behavior of the flame surface propagating in a two-stroke gasoline engine was reconstructed from the data acquired by multiple-ion probe measurement. In order to statistically evaluate the cycle-by-cycle variation of the flame propagation state, several features were created and extracted from the reconstructed flame surface and compared against the engine acceleration and other factors associated with the cycle variation. As a result, the features to determine the state of combustion on gasoline engines could be identified.

研究分野：燃焼計測

キーワード：イオンプローブ 火花点火機関 燃焼計測 ノッキング デトネーション

1. 研究開始当初の背景

CO₂ の排出量削減要求を受け自動車の電動化が急速に進んでいるものの、当面は内燃機関が動力源の主力であると考えられるため、内燃機関には高効率化が強く求められている。内燃機関の高効率化には従来よりも圧縮比を高める必要がある。しかしガソリンエンジンなど火花点火機関において圧縮比を高めようとする、ノッキングなどの異常燃焼が発生するため圧縮比の向上は制限される。ノッキングを避けながら圧縮比を高めるためには、ノッキング現象を詳細に計測し理解することが不可欠である。ノッキングは微小空間の燃料がごく短時間で一気に燃える現象であるため、高い時間解像度を持つ計測手法を用いなければ現象の詳細を捉えることはできない。このため、ノッキングなどのエンジン内異常燃焼を詳細に捉えることができる新しい計測方法が求められている。

2. 研究の目的

本研究グループが開発したマルチイオンプローブ法は、壁面に沿った火炎の動的挙動を複数のイオンプローブを用いることで高い時間解像度で捉えることのできる技術である。一般的なイオンプローブ計測では火炎中のイオンが電導性を持つことを利用し、火炎と接触させたプローブに流れる電流量から、火炎とイオンプローブの接触の検出や燃焼状態の推定が行われる。これに対しマルチイオンプローブ計測法は、複数のイオンプローブを燃焼室壁面に面的に配置することで、各イオンプローブと火炎面の接触時刻を記録することができる。一連の接触時刻データから燃焼室壁面に沿った火炎面の時間変化が再構成でき、間接的に火炎伝播状態を可視化することが可能となる。図1はマルチイオンプローブ計測システムの基本構成、図2はマルチイオンプローブ計測の性能を調査するための定容燃焼管である。図3は図2の定容燃焼管内を伝播するデトネーションをマルチイオンプローブ法で捉えた一例である。本計測では64本のイオンプローブを用いており、個々のイオンプローブが捉えた火炎到達時刻からデトネーション波面の詳細な動的挙動を再構成したものである。このように局所的な伝播速度が4km/sにも達するデトネーションから、伝播速度が数m/sの乱流火炎までも詳細に捉えることに成功しており、ガソリンエンジン内で発生するいかなる燃焼形態も十分にカバーし得る計測性能があることを確認している。研究開始当初はマルチイオンプローブ計測法をエンジンに適用することができなかった。研究期間内に、高密度に設置したマルチイオンプローブによりエンジン内の伝播火炎を安定的に捕える技術を確認することを目指して研究を遂行した。

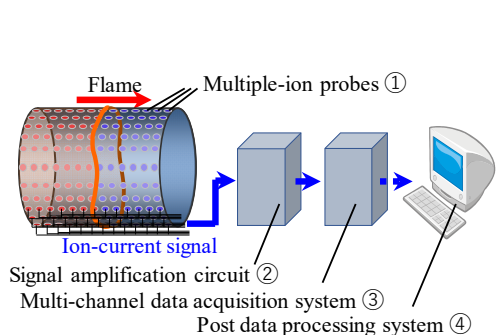


図1 マルチイオンプローブ計測システムの基本構成

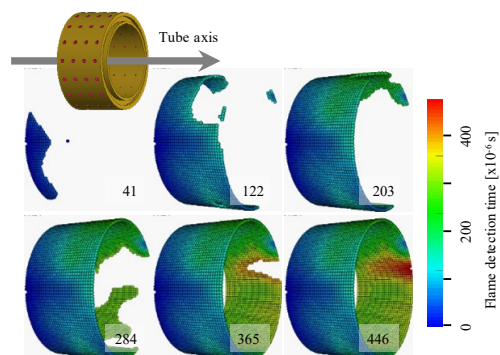


図3 燃焼管内を伝播する火炎をマルチイオンプローブ計測法で詳細に捉えた例

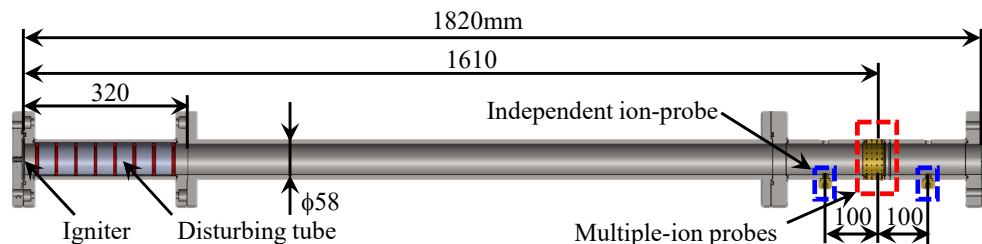


図2 燃焼管実験装置に設置したマルチイオンプローブ計測システム

3. 研究の方法

本研究ではエンジンヘッドが単純な半球形で、イオンプローブの設置が容易な 2 ストロークガソリンエンジンを用いて、このヘッドに 32 点のイオンプローブを設置しマルチイオンプローブによるガソリンエンジンの計測特性を調査した。図 4 にエンジンヘッドへのイオンプローブ設置位置を示す。スパークプラグを中心とした同心円かつ放射状に 32 点のイオンプローブを設置した。図 4 にはイオンプローブを設置したエンジンヘッドの外観も合わせて示す。

エンジンはパワーブローに搭載された状態であり、出力軸はファンに接続され運転中は常に負荷がかかっている。出力軸には精密な制動が行われていないため、燃焼変動に起因するわずかな速度変動がある。計測は WOT 状態で行い、その際のエンジン回転速度は約 6500rpm であった。計測時間は約 3 秒間である。

個別のイオンプローブはサイクル毎に火炎と接触した時刻が記録されるが、この時刻と点火時刻の時間差が 32 点のイオンプローブごとに検出した点火タイミングから各イオンプローブまでの火炎の伝播時間であり、イオンプローブ毎・サイクル毎に火炎伝播時間が得られる。イオンプローブ間の火炎伝播時間を 3 次スプラインで補間することにより、瞬間瞬間の火炎面形状を再構成することが可能となる。図 5 は連続 15 サイクルにおいて、エンジン内を伝播する火炎の動的挙動を再構成したものである。いずれのサイクルでも燃焼室中心に設置された点火プラグから火炎が伝播し、多くのサイクルで燃焼室端に向かうほど乱れが大きくなっている様子がわかる。図中右側は排気ポート側であるが、ほとんどのサイクルで排気ポート側に伝播速度が大きくなっている様子も見られ、火炎が吸気ポートから排気ポートに向かう掃気流に乗っていることがわかる。このように、イオンプローブの火炎検出データから描画した火炎の動的挙動はエンジン内の火炎伝播状態を大きな矛盾なく再現できており、マルチイオンプローブ計測法がエンジン内の伝播火炎をきちんと捕えることができていると考えられる。一方で、火炎の動的挙動がサイクル毎に得られるが、サイクル毎の火炎伝播状態の変動は大きい。したがってサイクル毎の伝播状態の変動を統計的に評価するためには、サイクル毎の伝播状態の特徴を表現できる各種特徴量を抽出し、これらを比較する必要がある。

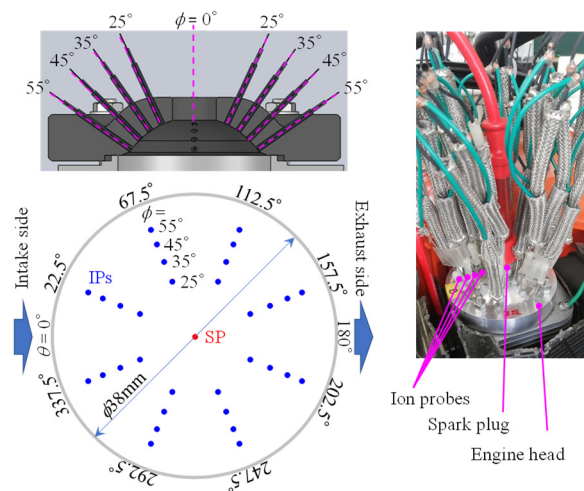


図4 2ストロークガソリンエンジンへの32点マルチイオンプローブの設置

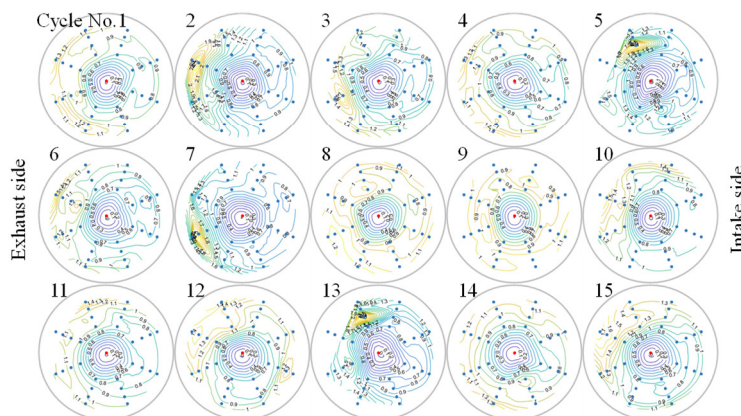


図5 32点マルチイオンプローブによるエンジン内伝播火炎の再構築例

図6は再構築した伝播火炎から伝播状態を表す特徴量の抽出を試みたものである。まず、イオンプローブ間を補間した火炎到達時間データから既燃領域面積の時間履歴を算出した。算出した既燃領域面積から、「①既燃領域面積が50%になった時間」を特徴量の一つとして算出した。次に既燃領域面積の面積増加率から、「②既燃領域面積増加率の最大値」、「③既燃領域面積増加率が最大値となった時間」、「④既燃領域面積増加率の重心位置での時間」もそれぞれ特徴量として算出した。

図7は、抽出した特徴量①~④をサイクル毎に取り出し、それらをエンジン回転速度、次サイクルまでのエンジン加速度、サイクル毎の火炎未検出イオンプローブ数に対して表したものである。特徴量①③④は火炎伝播速度に対して強い関係があると考えられ、いずれもエンジン回転速度の増加に対してこれらの値は早期化する傾向が見られる。エンジン回転速度の増加は一般に伝播速度の増加をもたらすことから、ここに見られる特徴量の変化傾向は矛盾しない。エンジン回転速度に対するばらつきは、④、①、③の順に小さく、エンジン回転数に対する火炎伝播状態を考察するためには、特徴量④を用いた場合に最も精度の高い判断ができると考えられる。エンジン加速度に対して特徴量を比較すると、エンジン加速度の増加に対して特徴量①③④は早期化し、②は増加する傾向がある。特徴量①③④では、④のばらつきが最も小さく、前述のエンジン回転数に対してみた場合と同様に④が火炎伝播の特徴を論じる上で最も精度の高い判断ができると考えられる。②については特徴量①③④とは性質の異なる特徴量であり、特徴を論じる上で重要な指標であると考えられる。火炎未検出イオンプローブ数の増加に対して特徴量

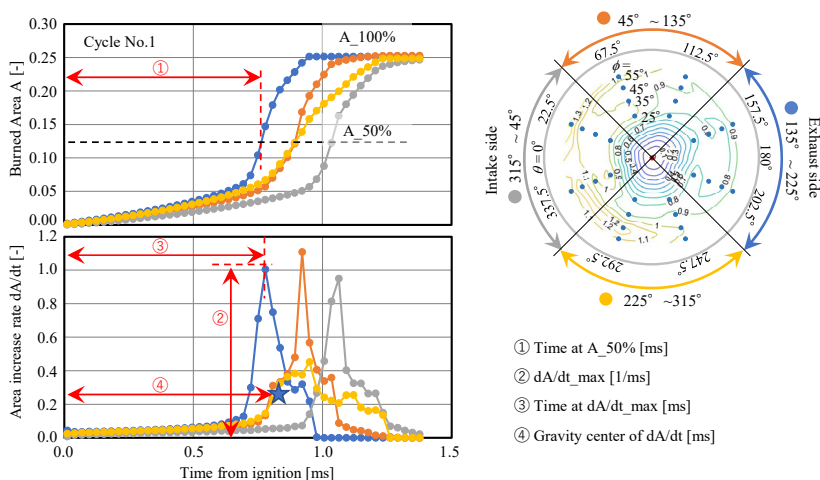


図6 再構築した伝播火炎からの伝播状態を表す特徴量の抽出

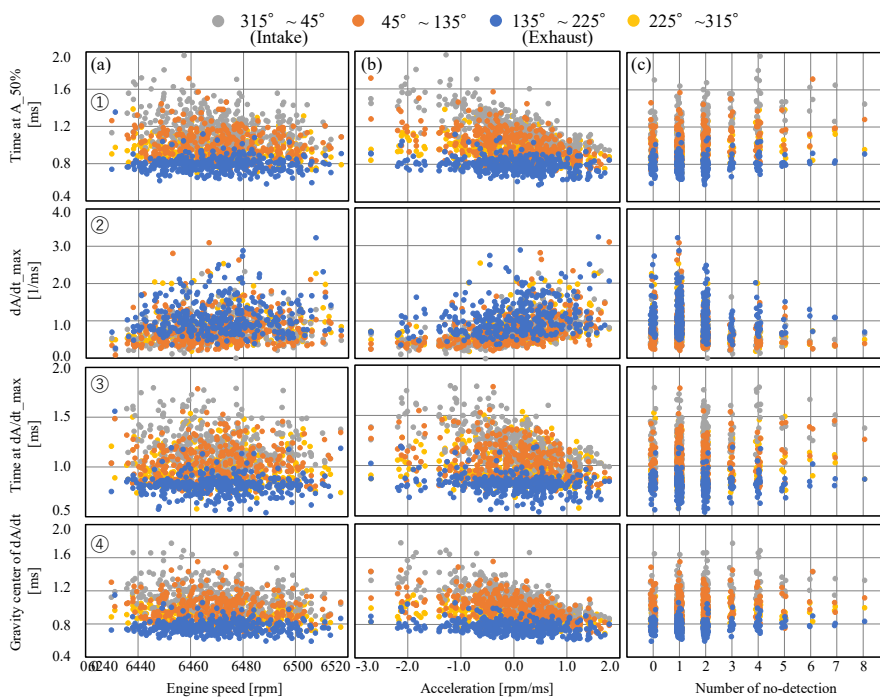


図7 抽出した特徴量の比較

①③④は遅延しており、④がもっともばらつきが小さい。一方特徴量②は減少している。火炎未検出イオンプローブ数の増加に対する特徴量の傾向からも、特徴量「②既燃領域面積増加率の最大値」と「④既燃領域面積増加率の重心位置での時間」は他に比べて精度よく特徴を判断できる特徴量であると考えられる。

4. 研究成果

ノッキングなど異常燃焼を含む、エンジン内の伝播火炎を詳細に計測することが可能なマルチイオンプローブ計測法を開発し、同計測法によるエンジン内伝播火炎の計測性能を調査した。マルチイオンプローブ計測法による記録データから、エンジン内を伝播する火炎の動的挙動を再構成することができ、エンジン内伝播火炎を間接的に可視化することが可能となった。可視化された火炎伝播状態は計測期間中の全てのサイクルについて大量に生成されるが、これらの可視化データを統計的に比較する必要性が生じた。このためサイクル毎に火炎伝播状態の特徴を表す特徴量を抽出し、エンジンの運転状態との比較で有効な特徴量を選択し、火炎伝播状態を精度よく判断できる特徴量を見出すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamada Shimpei, Shimokuri Daisuke, Shy Shengyang, Yatsufusa Tomoaki, Shinji Yuta, Chen Yi-Rong, Liao Yu-Chao, Endo Takuma, Nou Yoshihisa, Saito Fumihiko, Sakai Yasuyuki, Miyoshi Akira	4. 巻 227
2. 論文標題 Measurements and simulations of ignition delay times and laminar flame speeds of nonane isomers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 283 ~ 295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2020.12.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 YATSUFUSA Tomoaki, GOTO Yuki, HIROI Shota, YOSHIDA Kenji, SHIMOKURI Daisuke	4. 巻 17
2. 論文標題 Analysis of flame detection data from multiple-ion probes using feature extraction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.22-00148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 八房 智顯
2. 発表標題 マルチイオンプローブ法による燃料・希釈剤が伝播火炎に及ぼす影響の調査
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八房 智顯
2. 発表標題 マルチイオンプローブ法による火炎検出データ処理方法の開発
3. 学会等名 航空宇宙学会西部支部講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八房 智顯
2. 発表標題 マルチイオンプローブにより計測した伝播火炎データの処理技術の開発
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤 優輝, 八房 智顯
2. 発表標題 マルチイオンプローブを用いた2ストロークガソリンエンジン内の伝播火炎計測
3. 学会等名 第58回 燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 広井 笙太, 八房 智顯
2. 発表標題 マルチイオンプローブ計測検証用光学可視化燃焼管の設計
3. 学会等名 第58回 燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八房 智顯
2. 発表標題 マルチイオンプローブを用いた2ストロークガソリンエンジン内の伝播火炎計測
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Yatsufusa
2. 発表標題 Measurement of propagating flame in a gasoline engine under transient operating conditions using a multiple-ion probe
3. 学会等名 SETC2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八房 智顯
2. 発表標題 可視化・圧力・イオンプローブ計測による過給ガソリン機関の 高速高負荷運転時に発生する異常燃焼の詳細計測
3. 学会等名 第33回 内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------