

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04233

研究課題名(和文)放電路挙動の制御による希薄予混合気の着火促進機構の解明

研究課題名(英文)A study about ignition of lean mixture enhanced by spark discharge channel control

研究代表者

窪山 達也(Tatsuya, Kuboyama)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80578831

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)：希薄高流動条件、および触媒暖気条件を模擬したリタード着火条件における着火安定性に火花放電特性が与える影響を調べるため、三種類の放電特性の異なるコイルを用いて燃焼・可視化試験を実施した。この結果、希薄・高流動条件では、放電電流の増大によって、放電路の吹き消えの抑制や高エネルギー化によりリーン限界を拡大できることがわかった。一方、触媒暖気条件においては、放電期間の短いコイルでの燃焼安定性が低下した一方、高電流化、高エネルギー化を進めても着火安定性の向上にはつながらず、リタード点火時の着火安定性を向上するためには、放電期間の長期化が効果的であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
内燃機関の高効率化技術である希釈燃焼、実走行時に問題となる始動・暖機過程における着火安定性の向上を可能とする知見が得られており、ハイブリッド車両を含めた乗用車の燃料消費削減につながる制御技術に応用可能な成果が得られており、工学的な価値が高い。

研究成果の概要(英文)：To investigate the effect of spark discharge characteristics on ignition stability under retarded ignition timing during catalyst warm-up condition and ignition with the diluted mixture and enhanced in-cylinder flow condition, combustion analysis and the visualization of gnition and combustion were conducted using three types of ignition coils with different discharge characteristics. It was found that under diluted conditions, the lean limit can be extended using the ignition coil with the increased discharge current and energy because the blow-off of the discharge channel is suppressed. On the other hand, under the catalyst warm-up condition, the combustion stability deteriorated with the ignition coil with a short discharge period, and the ignition stability can not be improved even if the ignition current and energy were increased. This implies that a longer discharge duration is effective for improving the ignition stability with the retard ignition timing.

研究分野：熱工学

キーワード：火花放電 着火 点火 希薄燃焼 暖機過程 遅角燃焼

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素排出量の削減が社会的に強く求められており、各種熱エネルギー変換機器の熱効率向上が進められている。特に、排出二酸化炭素総量に占める割合が大きな運輸・民生部門からの排出量削減は、排出二酸化炭素総量の低減に大きく貢献する。これを背景として、燃焼エネルギーを利用する熱機関の大幅な熱効率向上が求められている。従来は 30%程度であった熱効率に対して、一部では最大熱効率が 40%を超える熱機関が市販化されるに至っており、次世代に向けては 50%を超える熱効率を実現するための燃焼制御技術の開発が求められる。また、従来は動力を取り出すエネルギー源として化石燃料が利用されてきたが、今後は再生可能エネルギーから作り出す水素やバイオ燃料の普及が予想される。高効率な熱エネルギー変換を実現し、かつ多様な燃料に対応可能な技術として、予混合気を高度に希薄化、希釈化する超希薄予混合燃焼への期待が高い。予混合気を既燃ガス等の不活性なガスで希釈すれば、燃焼温度が下がり熱損失と窒素酸化物排出量を低減できる。さらに、希釈燃焼では量論混合比を保つことで浄化効率が極めて高い条件で三元触媒を利用でき、高効率化を進めつつ、排出ガス中の環境影響物質濃度を都市部の空気以上に清浄化できる。しかし、希釈率を過度に高めると着火安定性が低下し、燃焼のサイクル変動が増大するために希釈率が制限されている。一方、空気過剰率を高める希薄燃焼は、燃焼温度低下による熱損失低減に加え、作動ガスの比熱比が増加するため、さらに高い熱効率が期待できる。ただし、三元触媒による窒素酸化物（NOx）の浄化が期待できず、燃焼過程での NOx 生成を抑制できるまで燃焼温度を低下させる必要があり、空気過剰率 2.0 以上まで希薄化を進める必要があるが、高度な希薄化は燃焼のサイクル変動の増大を招くために空気過剰率を高められず、実現に至っていない。すなわち、高い熱効率と排気清浄性を高度に両立する超希薄燃焼技術を実現するためには、サイクル変動の抑制が最大の課題である。

2. 研究の目的

超希薄予混合燃焼におけるサイクル変動増大の基本的な要因は、層流燃焼速度の低下と最小着火エネルギーの増大である。また、燃料成分が異なれば、層流燃焼速度や最小着火エネルギーが変化する。層流燃焼速度の低下に対しては、有限の時間で燃焼を完結させ、燃焼サイクルを成立させるために、強い乱れを与えて乱流燃焼速度を高めることで対応される。よって、希薄、希釈燃焼においては、強いガス流動と乱れの下で確実な着火を実現することが要求される。従来はこの課題に対して、着火のための供給エネルギーを増大することで対応されてきた。プラズマジェット(1-1)では、トーチ火炎を燃焼室内に噴き出すことで着火エネルギー、体積、乱れを強化している。レープルプラグ(1-2)では、向かい合わせたナイフ状の電極間に放電路を形成し、ローレンツ力を利用して放電路を走査することで着火エネルギーと体積を増大している。しかし、予混合気の希薄化による最小着火エネルギーの増大に加えて、強い乱れの下では最小着火エネルギーが指数関数的に増大することも報告されており、現状以上に高いエネルギー供給は装置の大型化や放電電極の耐久性低下を伴い、実用上の限界に近づいている。申請者はこれまでに、実機燃焼室内の放電路挙動の可視化観察と燃焼解析を実施し、高圧・強流動環境下では、火花放電路がガス流動に追従しながら伸長し、放電路が伸長することで着火を促進し、エネルギーを高めることなく燃焼変動を低減できることを確認してきた。また、火花放電の制御因子である放電電流波形によって放電路の伸長長さや吹き飛びの発生頻度が変化し、筒内流動が強く、希薄限界に近い条件ほど、放電特性が着火遅れ時間や着火のサイクル毎の変動に強く影響を与えることがわかった。図1は放電電流波形を変化（Base, HC, HE, SHE, 120mA）させて、空燃比（A/F）に対する火花点火式機関の燃焼変動（COV of IMEP）を調べた結果である。上図は標準条件で、下図は標準条件の5倍の強度のガス流動を与えた場合である。空燃比を高める（希薄化する）に従って燃焼変動が増大するが、放電電流波形によって変動の大きさが異なること、強流動場の方が放電電流波形の影響が大きいことがわかる。これらの結果から、放電電流波形などの制御により、燃焼室内での放電路挙動を最適化し、放電電極への供給エネルギーを高めることなく、着火を促進できる可能性が示唆される。着火促進に有効な放電路挙動とそのための火花放電制御要件を知るためには、放電路からの火炎核形成機構を明らかにし、放電路挙動を支配する放電制御因子を明確にする必要がある。また、高い平均ガス流速に加えて、強い乱れを与え、かつ高度に希薄化すると、放電路付近ではなく、放電路から空間的に離れた位置で化学発光が観察されることを報告する例もあり、平均流、乱れ強度などが火花放電から着火過程にどのような影響を及ぼすのかを理解することも重要である。

放電路伸長による着火促進と安定化のメカニズムは、①放電路から混合気塊へのエネルギー伝達効率の向上、②伸長した放電路による加熱体積の増大（大きな着火源の形成）と考えている。また、③強流動下における放電路の吹き飛びや短絡を抑制し、放電路を長く伸長させるためには、適切な時期に適切なエネルギーを供給すればよく、着火性を損なうことなく供給エネルギーを

最小化する最適な放電波形が存在すると考えている。本申請課題では、これらの仮説の検証を進め、初期火炎の形成と成長を促進するために有効な放電挙動を明確化し、着火促進に有効な放電挙動を実現するための放電制御の要件を明確化することを目的とする。従来の供給エネルギー強化による着火促進とは異なり、燃焼室内の火花放電挙動に着目して、予混合気塊へのエネルギー伝達の効率化を高めることが狙いである。

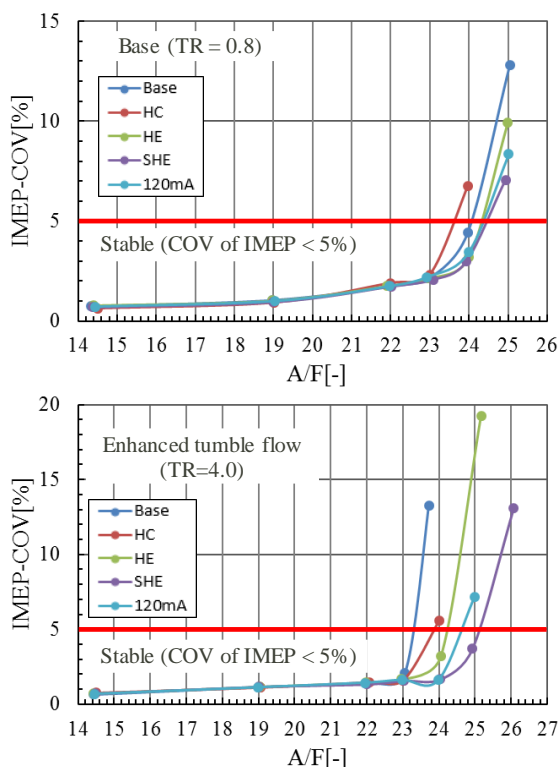


図 1 周囲ガス流動と放電電流波形が燃焼変動に及ぼす影響
(上：標準条件，下：強流動場)

3. 研究の方法

表 1 に実験装置の諸元を示す。本エンジンは筒内のプラグ周辺を可視化するためサファイア製の観察窓を備えており放電挙動を高速度撮影することができる。また放電挙動と放電特性および燃焼安定性との関係を調査するため、コイル二次側の電流及び電圧を計測した。

Table 1 Engine specifications

Engine type	4-stroke single cylinder
Bore × stroke	Φ80 × 81 [mm]
Displacement volume	400 [cm³]
Compression ratio	11.2
Fuel supply	Port fuel injection

実験では主に二つの運転条件における放電特性と燃焼安定性の関係を調査した。一つ目が希薄燃焼限界付近における放電特性と燃焼安定性の関係を調査した(Condition.1)。二つ目は触媒暖気運転時のリタード時における放電特性と燃焼安定性の関係を調査した(Condition.2)。これらの条件において最適な放電特性と燃焼安定性の関係を調査した。表 2 にそれぞれの実験条件を示す。各条件においてコイル特性が燃焼安定性に与える影響を評価する指標として、Condition1 では図示平均有効圧の変動係数(COV of IMEP)が 5%となる空燃比を、リーン限界 A/F と定義した。また Condition2 では COV of IMEP が 15%を超える点火時期をリタード限界と定義した。

Table 2 Experimental conditions

Condition	1 / 2
Engine speed	2000 / 1200 [rpm]
IMEP	600 / 200 [kPa]
A/F	14.4~Lean limit / 14.4
Ignition timing	MBT / MBT~Retard limit
Start of injection	180 [deg.BTDC]

4. 研究成果

4. 1. 放電特性が希薄運転限界に与える影響

図 2 に、3 種類のコイルを用いた場合の空燃比と IMEP の変動率の関係を示す。図 2 からは高エネルギーコイルのリーン限界空燃比が大きくなっていることがわかる。図 3 に A/F25 における放電特性を比較する、図 3 から High current コイル(以下 HC コイル)では、高電流化によってリストライクや吹き消えの発生頻度が減少することがわかる。この結果、混合気に対し、継続したエネルギー供給ができていと考えられる。High energy コイル(以下 HE コイル)では、高電流化と放電期間の長期化による投入エネルギーの増大によりリーン限界空燃比がさらに拡大することがわかる。

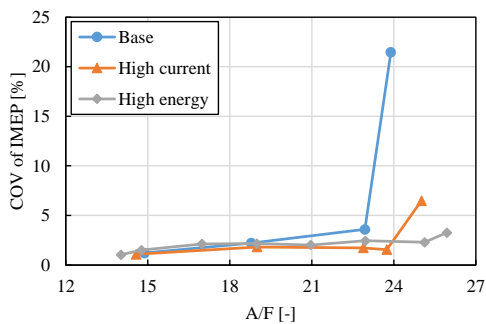


Fig.2 Relationship between A/F and COV of IMEP

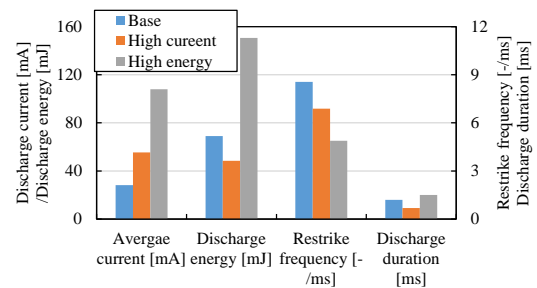


Fig.3 Discharge characteristics at lean condition

4. 2. 放電特性がリタード運転時の着火安定性に与える影響

図 4 に点火時期と COV of IMEP の関係を示す。図 4 からは異なるコイルを用いた場合のリタード限界に差が少ないが HC コイルの燃焼安定性が相対的に悪化していることがわかる。図 5 に点火時期 27 deg.ATDC における放電特性を示す。図 5 から、HC コイルを用いた場合、放電電流が増大するが放電エネルギーが減少していることがわかる。すなわち、リタード時の燃焼安定性の向上に対しては高電流化の効果は小さく、放電期間の短いコイルの燃焼が不安定になることがわかる。

4. 3. 放電エネルギー効率

図 6 にリーン、リタード試験における放電エネルギー効率と投入したエネルギーの関係を示す。放電エネルギー効率とは、計測した電流・電圧から求めた放電エネルギーの内、プラグ内部での損失を差し引いたものの割合であり、混合気に対する点火エネルギーの伝達効率を表す。図 6 からは同一条件・コイルでの放電エネルギーであっても放電回路伸長に伴うサイクル変動が存在していることがわかる。また、HE コイルではリーンな条件ではリタード条件に比べ 3~4 倍のエネルギーが投入できていることがわかる。これは吸気圧の上昇による要求電圧の上昇と、点火時期の進角や回転数の上昇によって点火プラグ周辺の流速が増加し放電回路伸長が促進されるためであると考えられる。一方リタード条件では投入効率が低下している、そのためコイル毎の投入エネルギーの差がほとんど無くなっている。

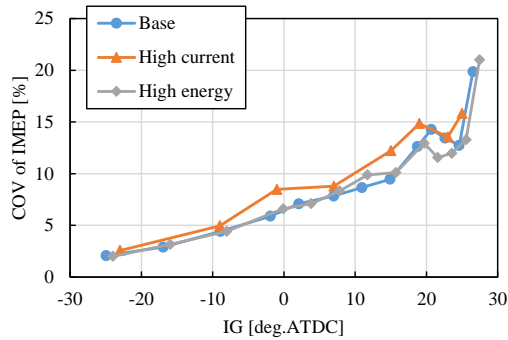


Fig.4 Relationship between IG and COV of IMEP

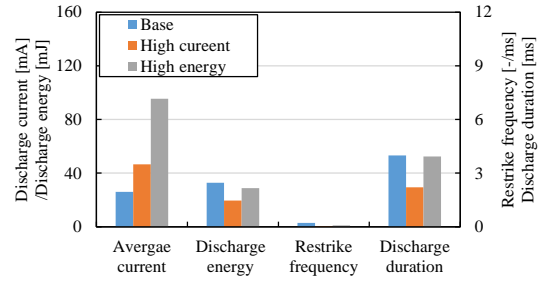


Fig.4 Discharge characteristics at retard condition

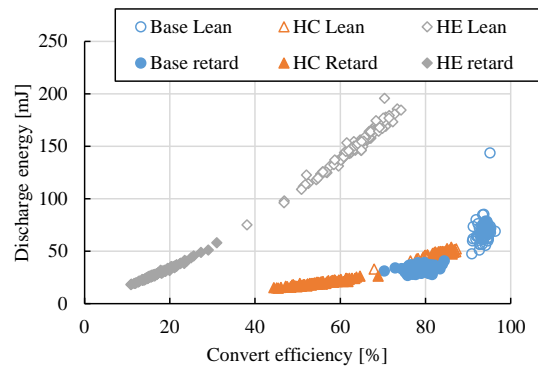


Fig.6 Relationship between energy input efficiency and discharge energy

4. 4. まとめ

希薄高流動条件と触媒暖気条件を模擬したリタード条件における着火安定性に火花放電特性が与える影響を調べるため、三種類の放電特性の異なるコイルを用いて燃焼・可視化試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- ・希薄・高流動条件では、放電電流の増大によって、放電路の吹き消えの抑制や高エネルギー化によりリーン限界が上昇した。
- ・触媒暖気条件においては、放電期間の短いコイルでの燃焼安定性が低下した一方、高電流化、高エネルギー化の影響は小さかった。よって、着火安定性を向上するためには、放電期間の長期化が効果的であると考えられる。
- ・放電エネルギーの伝達効率の比較から、リーン条件では高電流化により投入エネルギーが上昇するが、リタード条件ではエネルギー効率が低下し高電流化、高エネルギー化の効果が得られないことが示された。リタード条件においては、吸気圧の低下により要求電圧が低下し、回転数の低下と点火時期の遅角によってプラグ周辺流速が減少する結果、放電路伸長が小さくなるため、エネルギーの伝達効率が低下すると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 松本 脩、窪山 達也、森吉 泰生、白石 泰介	4. 巻 50
2. 論文標題 放電波形特性が予混合気への点火性能に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1502 ~ 1507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.50.1502	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 -

1. 著者名 CHEN Qingchu, KUBOYAMA Tatsuya, MORIYOSHI Yasuo, ORYOJI Kazuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Effect of discharge current and discharge duration on the discharge channel behavior and early flame formation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 21-00248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.21-00248	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 -

1. 著者名 Chen Qingchu, Kuboyama Tatsuya, Moriyoshi Yasuo, Oryoji Kazuhiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Study of Discharge Characteristics on Ignition Performance via High-Speed Imaging in a CVCC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3280 ~ 3280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12073280	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Chen Qingchu, Kuboyama Tatsuya, Moriyoshi Yasuo, Oryoji Kazuhiro
2. 発表標題 Effect of Discharge Characteristics on Ignition Performance with Diluted mixture under enhanced flow conditions
3. 学会等名 2021 JSAE Annual Congress (Spring)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 窪山達也
2. 発表標題 Effect of Spark Discharge Characteristics on Combustion Stability with Highly EGR Diluted SI Engine Operation
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONGRESS: SIA POWER TRAIN & ELECTRONICS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 窪山達也
2. 発表標題 火花点火過程における初期火炎と放電路の高速度同時撮影 混合気の弱成層化によるリーンバーンガソリン燃焼の希薄限界拡大
3. 学会等名 自動車技術会シンポジウム「パワートレイン開発における計測・CFD技術の最前線」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森平拓巳, 窪山達也, 森吉泰生, 助川 義寛
2. 発表標題 火花点火特性がガソリン機関の燃焼安定性に与える影響の実験解析
3. 学会等名 自動車技術会関東支部学術講演会
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
---------	---------