

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560239

研究課題名(和文)非平衡プラズマによる予混合気の着火・燃焼促成と燃焼モデルの構築に関する研究

研究課題名(英文) Study of improving the inflammability and initial combustion of premixed hydrocarbon by nonequilibrium plasma

研究代表者

田上 公俊 (TANOUE, Kimitoshi)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：60284783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、本研究では非平衡プラズマ(ストリーマ放電)の着火特性を詳細に調べる。定容燃焼器を用いた可視化実験により、非平衡プラズマの着火特性を調べ、熱プラズマ(アーク放電)と比較した。その結果、非平衡プラズマ着火は、従来の火花着火(熱プラズマ)と同様に可燃混合気を点火できること、また、体積的な着火を実現していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this ignition system, both thermal and non-thermal plasmas are utilized actively. In this paper, the focus is placed on the clarification of ignition characteristics of non-thermal plasma. For this purpose, the ignition and combustion characteristics of non-thermal plasma are examined and compared with those of a conventional spark ignition. As a result, it is found that streamer discharge characterized by non-thermal plasma cannot only ignite combustible mixtures as well as conventional thermal plasma, but there are also some advantages, such as volumetric ignition.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：プラズマ支援燃焼 燃焼 点火

1. 研究開始当初の背景

現在、地球規模での環境問題やエネルギー資源枯渇問題の観点からの燃焼研究には、高効率・低公害な燃焼技術の開発が求められている。近年、新たな新燃焼法として「プラズマ支援燃焼」(Plasma-Assisted Combustion)が注目されている。非平衡プラズマ(ストリーマ放電)が点火特性に及ぼす影響に関してはいまだ不明確なことが多い。例えば、非平衡プラズマで生成される活性化学種が化学反応に寄与するか、非平衡プラズマ単体での点火が可能か、熱プラズマと非平衡プラズマで点火機構に違いがあるか、などを明らかにすることは新点火技術開発の観点から実用的に重要であるばかりでなく、「プラズマ支援燃焼」の観点から学術的にも重要である。

2. 研究の目的

本研究では非平衡プラズマ(ストリーマ放電)の点火特性を詳細に調べる。定容燃焼器を用いた可視化実験により、非平衡プラズマの点火特性を調べ、熱プラズマ(アーク放電)と比較する。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すような2重の定容燃焼器を用いた。本燃焼器は、外部容器(内容積約18L)の内部に図2に示すようなステンレス製で直径120mm、長さ130mmの円筒形の内部容器(内容積約1L)が設置されている。内部容器には直径80mmの石英観測窓を有しており、外部容器の観測窓を通して、燃焼が観察できる。

本研究では、図3に示すような市販の自動車用点火プラグを非平衡プラズマ点火用に加工したプラグ(以降NTPと表示)を使用した。半径0.6mmのタングステン針を中心電極に取り付け、接地電極は12mm×10mmの銅板電極を対称に取り付けた。2つの接地板間の距離は2.5mmである。また、アーク放電への遷移を避けてストリーマ放電を保持するために絶縁体として薄い雲母板を接地電極に貼りつけた。図4にNTPの雲母がある場合(ストリーマ放電)と雲母がない場合(アーク放電)の放電の様子を示す。

4. 研究成果

本研究ではまず、繰り返し周波数を固定し、1パルス当たりのエネルギー(以降パルスエネルギー)とパルス数を変化させて、点火特性を調べた。

図5に初期圧力0.5MPaにおいて、繰り返し周波数を50kHzに固定し、パルスエネルギーとパルス数を変化させた場合の点火特性を示す。ここで●印は点火に至った条件、×は点火できなかった条件を示す。また図のTotal Energyとはパルスエネルギーとパルス数の積である。図5より、非平衡プラズマのみで従来の火花点火(熱プラズマ)と同様に可燃混合気を点火でき、その点火特性はパル

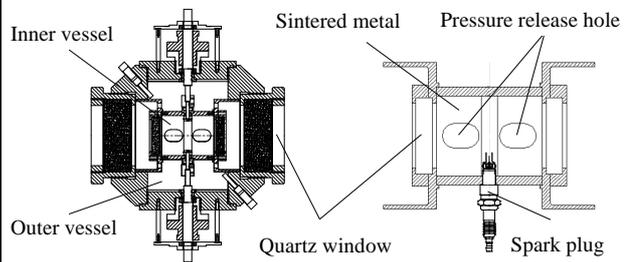


Fig.1 Overall view of chamber

Fig.2 Schematic of inner vessel

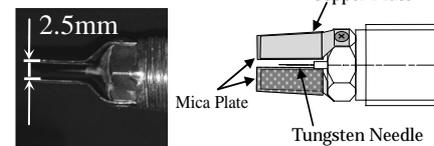
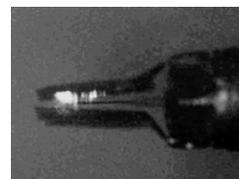


Fig.3 Ignition plug (NTP)



(a) Streamer discharge (Non-thermal plasma) w/ mica plate

(b) Arc discharge (Thermal plasma) w/o mica plate

Fig.4 Photographs of discharge emission for NTP

スエネルギーに依存することがわかる。

次に本研究では、シュリーレン撮影法による可視化により、初期火炎形成を調べた。実験は自動車用点火回路(TI)とパルス数10のストリーマ放電(NTI10)、パルス数100の

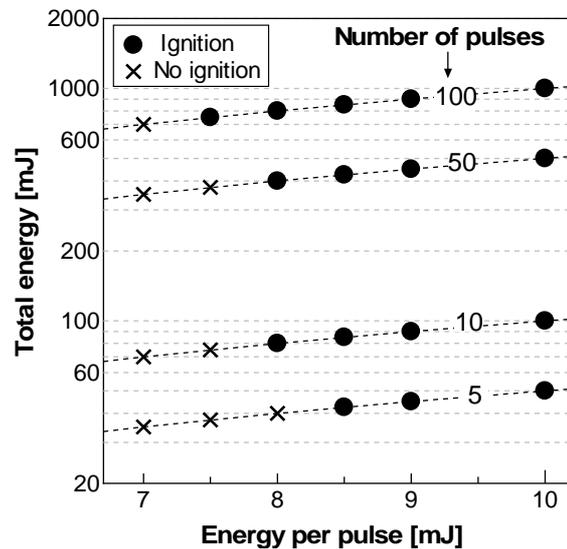


Fig.5 Effect of pulse energy on inflammability for non-thermal plasma

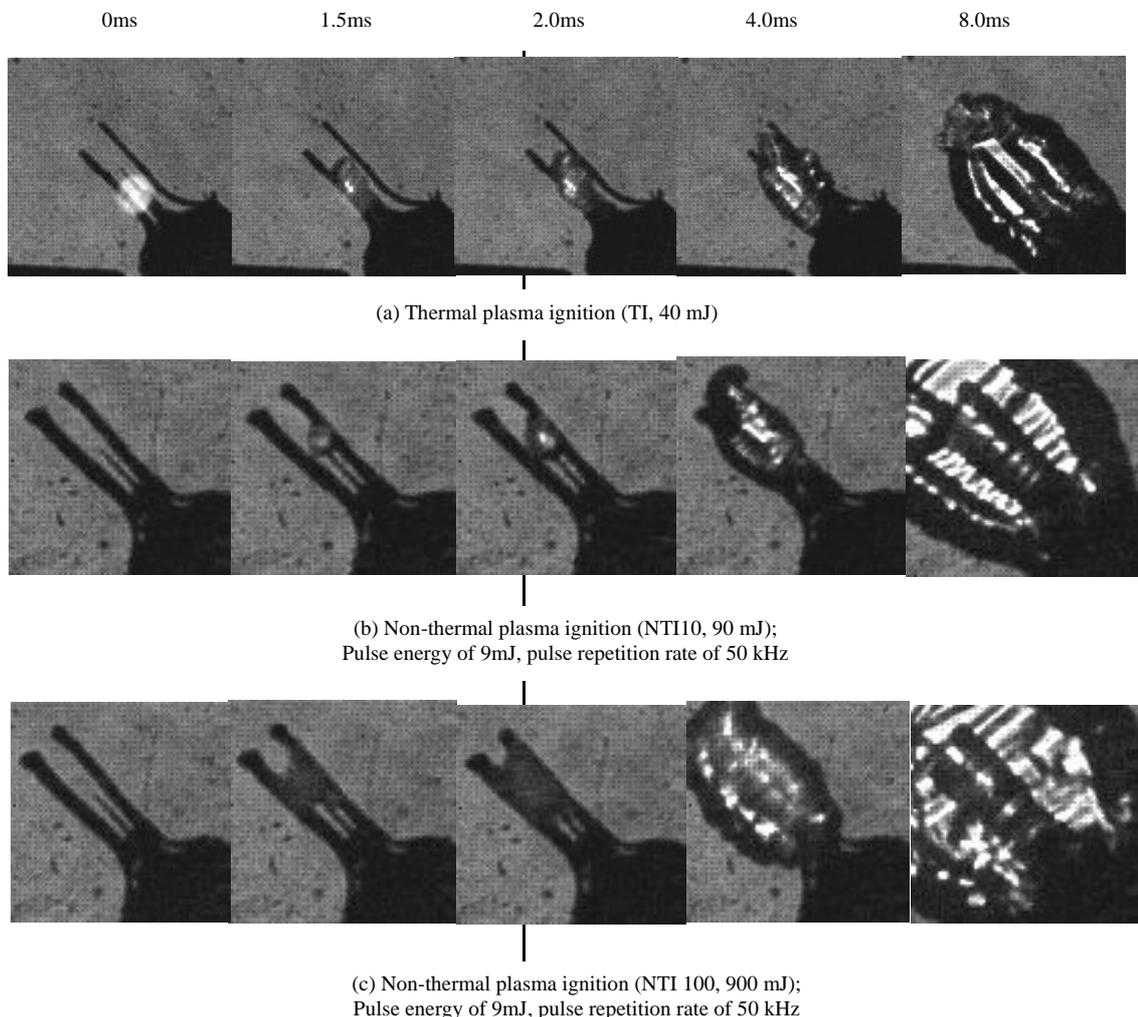


Fig.5 Schlieren photographs of the flame kernel formation at 1.0MPa by thermal plasma and non-thermal plasma

トリーマ放電(NTI100)で行った。
 図5に初期圧力は1.0MPaで、NTPを用いた
 アーク放電(TI)及びストリーマ放電(NTI)の
 初期火炎形成のシュリーレン写真を示す。こ
 こで時間軸は放電開始を0としている。
 図5より、NTIとTIを比較すると初期火炎形
 成に違いが見られる。TIはブレークダウンし
 た高温の放電部位において強い光が形成さ
 れた後、その箇所を中心に連続的な火炎核形
 成・成長が見られる。図5(a)の画像では示さ
 れていないが、動画では0msと1.5msの間で
 連続的な火炎の成長が確認できる。すなわち、
 TIにおける点火は熱プラズマで生成された
 高温領域の「火炎核」を中心に火炎が形成・
 成長する(点での点火)。これに対してNTI
 では、肉眼では観察できない弱い光のスト
 リーマ放電が広範囲に生じ(図4(a))、ある時
 間を経過後、突然一定の体積を有する反応領
 域が出現する(例えばNTI10では図5(b)
 1.5msの画像)。以上のような非平衡プラズ
 マによる初期火炎形成のメカニズムに関して
 以下のように考察した。

熱プラズマでは、点火エネルギーが直接ガ
 ス温度上昇に使われ化学反応が始まるが、非
 平衡プラズマでは供給したエネルギーは電

子エネルギーとして蓄積されるため、ガス温
 度はあまり上がらない。高エネルギーとな
 った電子の衝突により広範囲に生成された活
 性化学種により連鎖反応が進行し、ある時間
 経過後、化学反応による温度上昇を伴う広範
 囲な反応領域が出現したものと考えられる
 (体積的な点火)。なお、本装置の繰り返し
 パルス放電による非平衡プラズマで活性化
 学種が蓄積されることの確認は次節で行う。
 また、NTI10とNTI100を比較すると、NTI100
 の反応領域が広いことがわかる。これは活
 性化学種の生成範囲が広がったためと推察さ
 れる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に
 は下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

1. 田上公俊, 牛丸浩二, 菅雅裕, 窪山達也,
森吉泰生, 渡邊正人, 堀田栄喜, 繰り返
 しナノパルス放電プラズマの点火特性
 に関する研究- 非平衡プラズマの点火
 特性 -, 日本燃焼学会誌論文集, 第56
 巻175号, pp.59-66, 2014.

2. 渡邊正人,堀田栄喜,田上公俊,牛丸浩二,窪山達也,森吉泰生,繰り返シナノパルス放電プラズマ中のラジカル計測と点火特性, プラズマ・核融合学会誌, Vol.89 No.5, 229-233, 2013.
 3. 岡崎一也,田出統大,伊東慎也,橋本淳,加藤義隆,田上公俊,エタノール及びDME 拡散火炎の着火・消炎特性と火炎構造に関する研究, 日本機械学会論文集, 第 79 巻 804 号 B 編, pp.1594-1604, 2013.
 4. 岡崎一也,田出統大,伊東慎也,橋本淳,加藤義隆,田上公俊,非一様流中の炭化水素及び含酸素燃料の着火・消炎特性に関する研究, 日本機械学会論文集, 第 79 巻 804 号 B 編, pp.1605-1615, 2013.
 5. 田上公俊,加藤義隆,嶋田諒,岩清水健斗,宮脇健,嶋田不美生,橋本淳,エタノール及び PRF の層流燃焼特性に関する研究, 日本機械学会論文集, 第 78 巻 792 号 B 編, pp.1432-1440, 2012.
 6. 田上公俊,加藤義隆,岩清水健斗,宮脇健,嶋田不美生,橋本淳,2.0MPa までの高圧下での DME 予混合火炎の層流燃焼特性に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.5, pp.1021-1026, 2012.
 7. Kimitoshi Tanoue, Taijyu Baba, Tsutomu Matsunaga, Experimental study of combustion of ethanol and primary reference fuels in laminar nonuniform flows, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, pp.1029-1035, 2011.
- 〔学会発表〕(計 37 件)
1. 南野由登,高橋大樹,橋本淳,田上公俊,直噴ガソリンエンジンにおけるすすの生成に関する研究, 日本機械学会九州支部第 67 期総会・講演会講演論文集, 2014.3
 2. 茶堂勇一,菅雅裕,橋本淳,田上公俊,嶋田不美生,繰り返シナノパルス放電を用いた非平衡プラズマの点火特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 67 期総会・講演会講演論文集, 2014.3
 3. 橋本淳,南野由登,田上公俊,森吉泰生,壁面付着燃料液膜の燃焼とすすの生成に関する数値解析, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2013.12.
 4. 末光翔志,馬場和成,茶堂勇一,橋本淳,嶋田不美生,田上公俊,田中光太郎,小島健, 2.0MPa までの高圧下におけるペンテンおよび PRF の層流燃焼特性に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2013.12.
 5. 田出統大,南野由登,橋本淳,田上公俊,DEE および 1-ブタノール拡散火炎の消炎特性と火炎構造に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2013.12.
 6. 稲田元,田出統大,橋本淳,嶋田不美生,田上公俊,高圧対向流 DME 拡散火炎の燃焼特性に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2013.12.
 7. 菅雅裕,加藤義隆,橋本淳,嶋田不美生,田上公俊, RCEM を用いた高過給条件下でのノック特性に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2013.12.
 8. 橋本淳,南野由登,田上公俊,森吉泰生,ピストン付着燃料の燃焼とすすの生成に関する数値解析, 第 24 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 2013.11.26, (6pages)
 9. 末光翔志,馬場和成,茶堂勇一,橋本淳,嶋田不美生,田上公俊,田中光太郎,小島健, 2.0MPa までの高圧下での 2 ペンテン予混合火炎の層流燃焼特性に関する研究, 第 24 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 2013.11.26, (6pages)
 10. 田出統大,南野由登,橋本淳,田上公俊,非一様流中の DEE 火炎の基礎燃焼特性に関する研究, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会, 2013.9.28
 11. 馬場和成,末光翔志,茶堂勇一,橋本淳,嶋田不美生,田上公俊,高圧下における PRF の基礎燃焼特性に関する研究, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会, 2013.9.28
 12. 清水努,山本佳孝,田上公俊,辻川吉春,パラジウムナノ粒子群による炭化水素系燃料の触媒酸化に関する研究, 化学工学会盛岡大会 2013, 2013.8.8
 13. 橋本淳,田上公俊,森吉泰生,高過給ガソリン直噴エンジンにおける PAH の成長とすすの生成, 自動車技術会春季大会講演論文集, Paper, 2013.5, (4pages)
 14. 稲田元,遠藤亮祐,伊東慎也,橋本淳,田上公俊,高圧下における炭化水素火炎の消炎特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会講演論文集, 2013.3
 15. 菅雅裕,牛丸浩二,田上公俊,繰り返シナノパルス放電による非平衡プラズマの点火特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会講演論文集, 2013.3
 16. 田出統大,岡崎一也,伊東慎也,橋本淳,田上公俊,非一様流中でのアルコール及びエーテル燃料の着火・消炎特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会講演論文集, 2013.3
 17. 田上公俊,末光翔志,宮脇健,伊東慎也,馬場和成,橋本淳,高圧下におけるペンテン及び PRF の基礎燃焼特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会講演論文集, 2013.3
 18. 牛丸浩二,菅雅裕,田上公俊,窪山達也,森吉泰生,堀田栄喜,繰り返シナノパル

- ス放電プラズマの点火特性に関する研究- 熱プラズマと非平衡プラズマの点火特性 -, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012.12, (2pages)
19. 遠藤亮祐, 岡崎一也, 稲田元, 嶋田不美生, 田上公俊, 高圧下における DME 拡散火炎の消炎特性に関する研究, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012.12, (2pages)
20. 岡崎一也, 伊東慎也, 田出純大, 橋本淳, 田上公俊, DME およびエタノール拡散火炎の消炎特性と火炎構造に関する研究, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012.12, (2pages)
21. 橋本淳, 伊東慎也, 岡崎一也, 宮脇健, 小島健, 田上公俊, 含酸素燃料の燃焼速度および着火消炎特性に及ぼす燃料構造の影響, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012.12, (2pages)
22. 橋本淳, 田上公俊, 森吉泰生, 高過給火花点火式直噴機関における粒子状物質の成長, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012.12, (2pages)
23. 田上公俊, 鈴木祐史, 宮脇健, 伊東慎也, 橋本淳, ペンタンの基礎燃焼特性に関する研究, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 2012.11, (6pages)
24. 橋本淳, 田上公俊, 森吉泰生, 高過給火花点火式直噴エンジンにおける粒子状物質の成長, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 2012.11, (6pages)
25. 岡崎一也, 田出純大, 伊東慎也, 橋本淳, 田上公俊, エタノール及び DME 拡散火炎の消炎特性に及ぼす火炎構造の影響, 第 17 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2012.6.21
26. 岩清水 健斗, 嶋田 諒, 宮脇 健, 橋本 淳, 田上 公俊, 高圧雰囲気下におけるエタノール及び DME 予混合火炎の層流燃焼特性に関する研究, 第 17 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2012.6.21
27. 田上 公俊, 加藤 義隆, 岩清水 健斗, 宮脇 健, 嶋田 不美生, 橋本 淳, 2.0MPa までの高圧下での DME 予混合火炎の層流燃焼特性に関する研究, 自動車技術会春季大会講演論文集, Paper20125130, 2012.5, (6pages)
28. 橋本 淳, 田上 公俊, 森吉 泰生, 筒内ガスの残留に起因する粒子状物質の成長と過早着火, 自動車技術会春季大会講演論文集, Paper20125209, 2012.5, (4pages)
29. 岡崎一也, 大野一章, 伊東慎也, 橋本淳, 田上公俊, 非一様流中でのエタノール及びブタノール火炎の基礎燃焼特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 64 期総会・講演会講演論文集, 2012.3
30. 宮脇健, 嶋田諒, 岩清水健斗, 伊東慎也, 橋本淳, 田上公俊, 高圧雰囲気下にお

- る炭化水素燃料の燃焼特性に関する研究, 日本機械学会九州支部第 65 期総会・講演会講演論文集, 2012.3
31. 大野一章, 岡崎一也, 伊東慎也, 橋本淳, 田上公俊, 非一様流中でのエタノール及びブタノール火炎の燃焼特性に関する研究, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2011.12, (2pages)
32. 嶋田諒, 岩清水健斗, 宮脇健, 田上公俊, 2.0MPa までの高圧下での炭化水素予混合火炎の燃焼特性に関する研究, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2011.12, (2pages)
33. 田上公俊, 繰り返しパルス放電プラズマを用いた点火システムの開発, 大分大学技術交流会, 2011.12
34. 田上公俊, 嶋田諒, 岩清水健斗, 宮脇健, 2.0MPa までの高圧下での炭化水素予混合火炎の燃焼特性に関する研究, 第 22 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 2011.11, (6pages)
35. 大野一章, 岡崎一也, 田上公俊, 非一様流中の炭化水素及び含酸素燃料の着火・消炎特性に関する研究, 日本機械学会九州支部 宮崎講演会, 2011.9
36. 田上公俊, 堀田栄喜, 森吉泰生, 清水尚博, 繰り返しパルスプラズマ放電を用いた点火システムの開発, 第 2 回プラズマ支援燃焼研究会 2011, 2011.7
37. 堀田栄喜, 渡邊正人, 田上公俊, 森吉泰生, 清水尚博, 高電圧パルス放電の燃焼制御への応用, 第 2 回プラズマ支援燃焼研究会 2011, 2011.7

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田上 公俊 (TANOUE KIMITOSHI)
大分大学・工学部・教授
研究者番号: 60284783

(3) 連携研究者

堀田 栄喜 (HOTTA EIKI)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号: 70114890

森吉 泰生 (MORIYOSHI YASUO)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40230172