

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04939

研究課題名(和文) 熱機関の環境負荷低減のための先進的な低温プラズマ適用

研究課題名(英文) Advanced application of low-temperature plasma for reduction of environmental impact in heat engines

研究代表者

段 智久 (Dan, Tomohisa)

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：80314516

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)：本申請研究では、熱機関の環境負荷低減を目的として、高電圧を電極に印加して生じる放電により生成するプラズマをガス燃料等と空気の混合気、あるいは燃焼反応の中間生成物群に照射し、燃焼に与えるプラズマの効果を検証した。二元燃料エンジンを試作して、燃焼室内部もしくは吸気管に放電装置を設置して、エンジン運転性能に与える影響を調べた。その結果、ある程度の印加電流までは排ガス中のNOxおよび未燃焼炭化水素の排出濃度削減の効果は見られたが、印加電流が増加するとスパーク放電を生じて排ガス性能が悪化する傾向となった。今後は燃焼室内部でバリア放電を可能にする電極を試作するなど継続的な研究課題を克服する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高電圧を電極に印加して生じる放電により生成するプラズマのうち、低電流で得られる低温プラズマは大気圧場では良好な再現性を得られることは既知である。本研究で試行したより高い圧力場での低温プラズマ生成は、燃焼現象の改善からある程度有効に作用することが明らかとなった。ただし、より広いエンジン燃焼条件に適用するためには更なる工夫が必要であることも明らかになった。その中でナノ秒パルス高圧電源による放電の試行は、バリア放電の可視化の実績とともに熱機関の燃焼現象の改善に指針を与えるものであり、それらの成果を今後の研究課題として取り組んでいく。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of plasma on combustion was examined by irradiating a mixture of gas fuel and air, or a group of intermediate products of combustion reactions, with plasma generated by discharges produced by applying high voltage to electrodes, with the aim of reducing the environmental impact of heat engines. A prototype dual-fuel engine was built, and a discharge device was installed inside the combustion chamber or in the intake pipe to investigate the effect on engine operating performance. The results showed that the engine was effective in reducing NOx and unburned hydrocarbon emission concentrations in the exhaust gas up to a certain level of applied current, but as the applied current increased, spark discharge occurred and exhaust gas performance deteriorated. We will continue to search for better discharge conditions.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：低温プラズマ 熱機関 燃料燃焼 排気エミッション 燃焼性向上 コロナ放電 ナノ秒パルス高圧電源

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国において、国内外の物流を担う船舶では、その推進原動力、船内発電あるいは蒸気生成を目的として内燃機関やボイラーなどの熱機関が利用されている。そのエネルギー源は高分子の炭化水素を成分とする石油系燃料が多く、燃料燃焼によって生成する二酸化炭素 CO₂ の船外排出は避けられない。そのような中、産業革命以降の急激な地球温暖化による気候変動が顕著になっている昨今、各社会分野において CO₂ 等の温室効果ガス GHG を更に排出削減することが必要である(気候変動枠組条約 UNFCCC の COP21 パリ協定(2015年)など)。

国際海事機関 IMO においても GHG 排出削減を目指すための議論がされている(GHG 削減戦略(2018年4月)など)。その中で船舶のエネルギー効率設計指標 EEDI (= 輸送仕事当りに排出する CO₂ 量) を導入して、CO₂ 排出抑制に取り組んでいるところである。EEDI の値を制定された条約に従って今後低減していくためには、船舶の輸送仕事率 (= 貨物積載量 t × 船舶速度 mile/h) を大きくするか、あるいは CO₂ 排出率 (= 無次元換算係数 × 燃料消費率 g/kWh × 機関出力 kW) を小さくすることが必要である。その対応策の一つは、低炭素な燃料として液化天然ガス LNG 等のガス燃料を熱機関に適用することである。

LNG はメタン CH₄ を主成分とするガス燃料であり、単位体積・単位発熱量当りに含有する炭素原子量が石油系燃料に比較して小さい特徴がある。前述の燃料消費に対する CO₂ 排出の無次元換算係数 (t-CO₂ / t-燃料) は、軽油が 3.206、重油が 3.114 であるのに対して、LNG は 2.750 であり、同量の燃料消費に対して GHG 排出量を抑えることが可能である。その一方で、熱機関から未燃焼の燃料が排出された場合、地球温暖化効果係数が高いメタン(CO₂ の 1 に対して CH₄ は約 25) を地球環境に排出する恐れがある。そこで、ガス燃料を用いた熱機関では、燃料の燃焼を促進させ完全燃焼を行わせるための仕組みが必須となる。

2. 研究の目的

本申請研究課題では、熱機関の環境負荷低減を目的として、高電圧を電極に印加して生じる放電により生成するプラズマをガス燃料等と空気の混合気(未燃ガス)に、あるいは燃焼反応の中間生成物群(燃焼反応ガス)に照射し、燃焼に与えるプラズマの効果を検証する。

特に、熱機関の燃焼室内においてプラズマを生成し、未燃ガスや燃焼反応ガスに低温プラズマを作用させるシステムを製作する(高圧力場でのプラズマ支援燃焼)。またガス燃料を吸気管から供給し、燃焼室内に噴射する少量の液体燃料の自己着火によってガス燃料混合気を着火させる内燃機関システムをレトロフィットにより製作する(ガス燃料利用の二元燃料エンジン)。この試験研究用の二元燃料エンジンにおいて、プラズマ支援燃焼の効果を明らかにし、熱機関の総合的な熱効率を向上させることを試みる。これにより、熱機関が温暖化効果ガス排出によって与える環境負荷を先進的な手法で低減させることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 大気圧流れ放電実験

Fig.3.1およびFig.3.2に装置の概念図を示す。流れは吸引機を使用して、65AのPVCパイプ内で発生させた。実験の方法はつぎのとおり。吸引器に加わる電圧を制御し、風速を変化させた。風速は熱線流速計を用いて、半径方向に3カ所測定した。そして放電を行い、電圧・電流値をデータロガーで、1 ms 間隔で合計 1 s 測定した。また実験条件の風速に関しては、2.75、3.00、5.00、7.50 m/s、電流に関しては 2.0 ~ 10.0 mA まで 2.0 mA 間隔で設定し、それぞれの条件で放電させた。

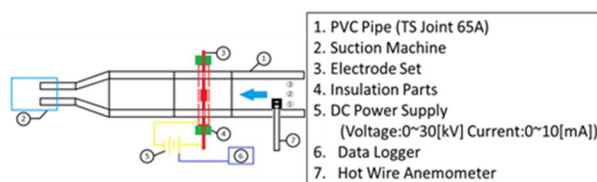


Fig.3.1 Concept of the experimental apparatus



(a) Positive electrode (b) Negative electrode

Fig.3.2 The first electrode set

(2) ベースエンジンの燃焼室内放電実験

供試エンジンには、つぎに示す諸元からなる小型直接噴射式ディーゼルエンジンを使用した。このエンジンは市販のものから、燃料噴射系を電子制御燃料噴射装置に改造したものである。

型式：NFD-13ME (ヤンマー社製) / 形式：水冷横型短期等 4 サイクルディーゼルエンジン

ボア × ストローク mm：92 × 96 / 排気量：0.639 L / 燃料噴射形式：直接噴射式

圧縮比：17.7(諸元)、11.39(電極設置用改造後) / 連続定格出力：8.1 kW/2400 rpm

最大出力：9.2 kW/2400 rpm / 噴射ポンプ：コモンレール方式

噴射ノズル：4 孔式 / 開弁圧：16.7 MPa / 閉弁圧：13.36 MPa (開弁圧の 80%)

放電装置を燃焼室に導入する方法としてエンジンにプラズマ発生装置をシリンダー内に横断するように配置し、高電圧導入はガソリンエンジンに使われるスパークプラグを用いた。本項目の実験では以下の 2 つの電極の形状を試行した。それぞれの電極を電極 A、電極 B と呼称する。

- A. 丸棒にワイヤーを巻き付け、有刺鉄線のようなものを穴の空いたパイプで覆い、ワイヤーの先端からパイプの内側の側面に放電させた。
- B. 丸棒にワイヤーを巻き付けた有刺鉄線のようなものからエンジンのシリンダヘッドに放電させた。

これらの電極を供試機関に取り付け、機関回転数 2000 rpm 一定とし、連続定格出力の 23 % の 1.5 kW の負荷を与えた。この時の設定電流値は電極 A において、0.0、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mA とし、電圧はすべて最大電圧値 (30 kV) に設定した。また電極 B における設定電流値は 0.0、0.1、0.2、0.4、0.8 mA とした。これらの条件の下、筒内圧力 MPa、電流電圧値 mA、kV、HC、CO、NO_x、CO₂ を測定した。

(3) Dual Fuels (DF)エンジンの燃焼室内放電実験

前項に記載のベースエンジンをさらに構造変更して、天然ガスを吸気管内で噴射して、主燃焼室に混合気として供給して軽油噴射によって着火を行うようにした (Dual Fuels (DF)エンジンと呼称する)。

作成した DF エンジンの実験装置概略図を Fig.3.3 に示す。実験用エンジンの軸端部に電気式動力計を接続し、これを制御することで、一定回転数で負荷をかけた。また、電気式動力計にロータリーエンコーダーを取り付け、機関回転数やクランク角度を調べた。なお、ロータリーエンコーダーはデータロガーに接続しており、任意の時期の筒内圧や燃焼圧、放電時の電圧値と電流値の監視を PC にて行った。さらに、ロータリーエンコーダーなどからの信号を Arduino や IC で読み取ることで、オーバーラップの起こらないタイミングかつ吸気弁の開いているときに、一定の圧力で天然ガスを噴射させた。また、このときガスインジェクターの手前に設置されたガス流量計によって、天然ガス消費量も測定した。燃焼室内で放電を行うために、放電用電極を挿入できる専用のシリンダブロックと電極とのクリアランスを確保したピストンクラウンを作成した。また、電極とシリンダブロックの接続部に使用した絶縁スリーブ、高電圧導入プラグは市販のものを加工し、作成した。軽油はポンプによって燃料タンクからコモンレール式燃料噴射システムに移送され、100MPa 程度まで蓄圧された。これを任意のタイミング、期間で噴射ノズルに送り、燃料を燃焼室内に供給した。このとき同時に、コモンレールと噴射ノズルの間に設置した圧力センサーによって PC 上で燃料噴霧圧の監視も行った。本実験では吸気脈動を低減できるサージタンクを使用し、オリフィス差圧計を設置することで、吸気量の計算を行った。また排気管下流部付近に採取用チューブを取り付けることで排気ガスの一部を取り出し、これの分析を行った。

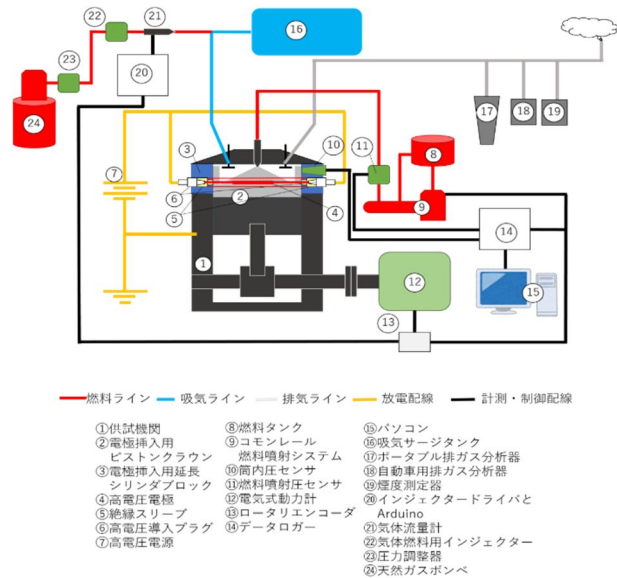


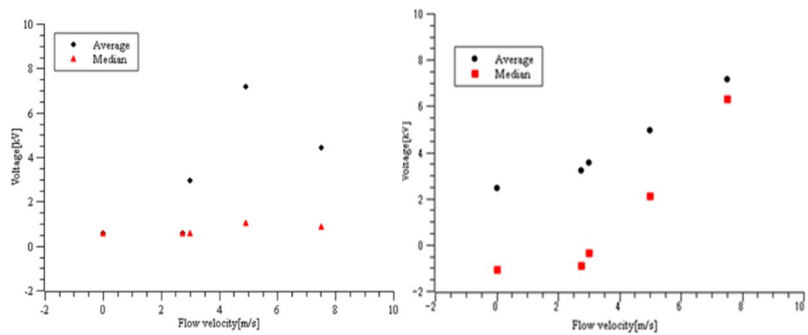
Fig.3.3 Schematic diagram of DF engine

燃焼室内で放電を行うために、放電用電極を挿入できる専用のシリンダブロックと電極とのクリアランスを確保したピストンクラウンを作成した。また、電極とシリンダブロックの接続部に使用した絶縁スリーブ、高電圧導入プラグは市販のものを加工し、作成した。軽油はポンプによって燃料タンクからコモンレール式燃料噴射システムに移送され、100MPa 程度まで蓄圧された。これを任意のタイミング、期間で噴射ノズルに送り、燃料を燃焼室内に供給した。このとき同時に、コモンレールと噴射ノズルの間に設置した圧力センサーによって PC 上で燃料噴霧圧の監視も行った。本実験では吸気脈動を低減できるサージタンクを使用し、オリフィス差圧計を設置することで、吸気量の計算を行った。また排気管下流部付近に採取用チューブを取り付けることで排気ガスの一部を取り出し、これの分析を行った。

4. 研究成果

(1) 大気圧流れ放電実験

ネジにエンザートを取り付けた電極の場合、無風条件下で設定電流値が 10 mA のとき、アーク放電が起きたと考えた。しかし、Fig.4.1 によると、3 m/s 以上では平均値と中央値の差が生じることがわかる。これは放電が不安定化し、アーク放電が生じにくくなると考えられる。一方、全ねじのインコネル棒に針金を取り付けた電極では、風条件下



(a) The first electrodes (b) the second electrodes
Fig.4.1 Flow velocity - Voltage at 10 mA (Current set value)

で設定電流値が 10mA のとき、スパーク放電が起きたと考えた。実験時は湿度が高いため、電極形状よりも湿度の影響で安定した放電が得られにくかったと考える。しかし、Fig.4.4 によるとこの場合は流速が増加するにつれ平均値と中央値の差が縮まったため、安定化に向かったと考える。また本研究では、2 mA などの比較的低電流では、流速と測定値の平均値 - 中央値の差に関係は見られなかった。

(2) ベースエンジンの燃焼室内放電実験

Fig.4.2 に電極 A を燃焼室内に設置し、燃料運転を行っている供試機関のシリンダー内にて放電を行い、その際の筒内圧と電流電圧の関係を設定電流値ごとに示す。横軸は圧縮上死点 (T.D.C. : Top Dead Center) を 0° としたクランク角度、左側の縦軸は筒内圧力、右側の縦軸は電流及び電圧を示す。図は電極 A において設定電流値を 1.0、10.0 mA としたときの実験結果を示す。また排ガスを採取し、設定電流値ごとの排出量を Fig.4.3 に示す。この実験結果から以下のことが見受けられた。

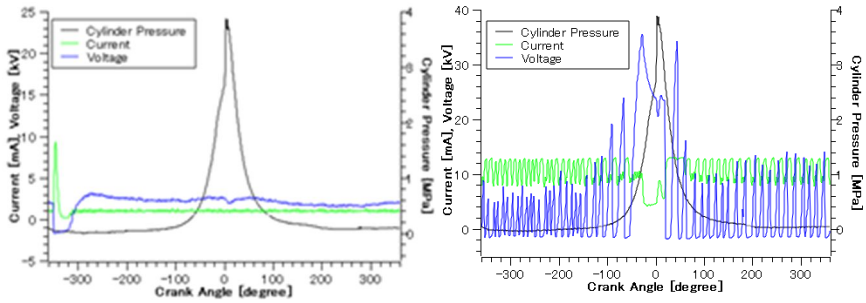


Fig. 4.2 Relationship between crank angle and cylinder pressure under 1.0 and 10.0 mA discharge for electrode A

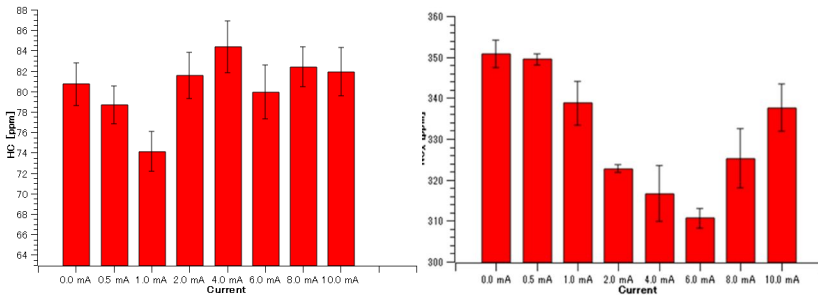


Fig. 4.3 HC and NO_x emissions for electrode A

電流値が 2.0 mA 以上になるとスパーク放電が頻繁に発生し、電流電圧値が不安定になる。

未燃性成分では 0~1.0 mA の範囲では電流値を上げていくと減少することができたが、2.0 mA 以上となると傾向が見受けられなかった。

NO_x の値は 6.0 mA までは減少していき、8.0 mA 以上では上昇していった。

に関しては電極 A における陰極が電流値を上げることで電圧値が上がり、陰極を出発した電子は電子なだれを形成する。そこで電圧がさらに加えられると電子なだれは陽極に到達する前にストリーマに転換して全路破壊が生じる。このような現象が電流値を上げることでさらに頻繁に起き、スパーク放電の周波数が増加するとともに電圧値の標準偏差が増加したと考えられる。

に関してはコロナ放電を安定的に発生させている 0~1.0 mA ではラジカル生成量が多く、減少傾向が見受けられたが、スパーク放電に移行してしまうと、はっきりとした傾向が見受けられなかった。

に関して、NO_x は熱非平衡プラズマによって除去されることが過去の研究より証明されているが熱平衡プラズマによってもある条件下では低減されていることも証明されている。それにより、0.0~6.0mA までは電流値を上げていくと NO_x の値は減少していく。しかし、8.0 mA 以上となると電圧上昇に伴い、高温中での N₂ 分子と O₂ 分子の反応を促進し、NO_x の増加が見受けられたと考えられる。

電極 A と同様に電極 B の筒内圧と電流電圧値の関係図を Fig.4.4 に示し (設定電流値が 0.1、0.8 mA の時) また排気ガスの排出量を Fig.4.5 (HC と CO₂) に示す。この実験結果から以下のことが見受けられた。

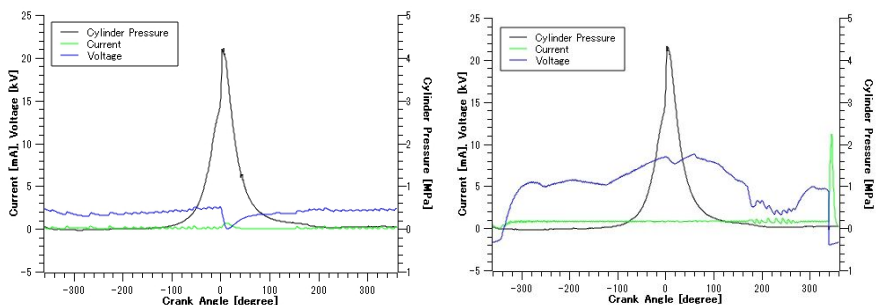


Fig. 4.4 Relationship between crank angle and cylinder Pressure under 1.0 and 0.8 mA discharge for electrode B

排気行程と吸気行程の間でスパーク放電が 0.2 mA 以上となると発生してしまう。

電極 A と比べ、スパーク放電が起きる頻度が減少した。

未燃性成分 (HC、CO) は電流値を上げていくと減少傾向にあることが確認された。

NO_x、CO₂ の値は 0.0~0.2 mA の間では減少傾向にあり、0.2~0.8 mA では増加傾向にあることが確認された。

に関して、排気行程と吸気行程ではエンジンの構造上、バルブが放電装置に物理的に近づいてしまう。また燃焼後のガスが排出される場所でもあるため、導体である煤や塵などの濃度が高くなってしまふ。このような物理的な原因により、スパーク放電が誘発されたと考えられる。

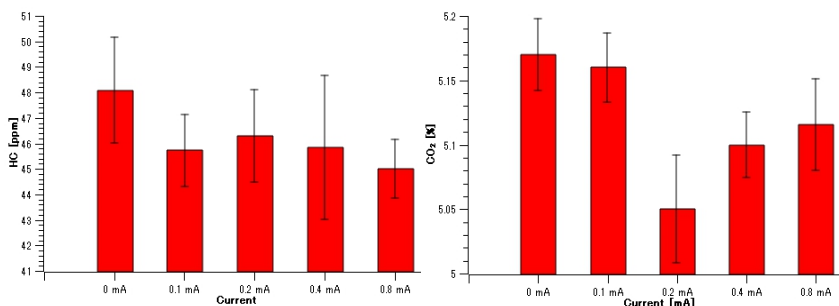


Fig. 4.5 HC and CO₂ emissions for electrode B

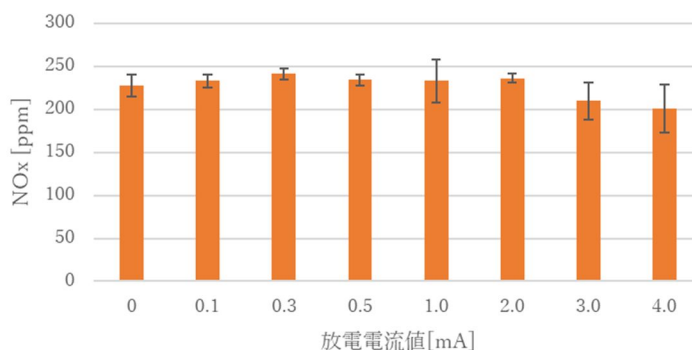
に関して、これは電極 A における設定電流値と比べコロナ放電を狙った設定電流値であったため、スパーク放電の頻度が減少したと考えられる。ただし、同じ設定電流値において電極 Aの方がスパーク放電を起こす頻度は小さい。これは陽極に燃料の煤や塵などが晒されやすくなりこれらの微粒子がスパーク放電を誘発したと考えられる。

に関して、コロナ放電が生成するラジカルによって未燃性成分を低減させたと考えられる。また電流値を増加させることによって電圧も上昇し、コロナ放電が影響する範囲が広がり未燃性成分は電流値が増加すると低減されるということが確認できた。

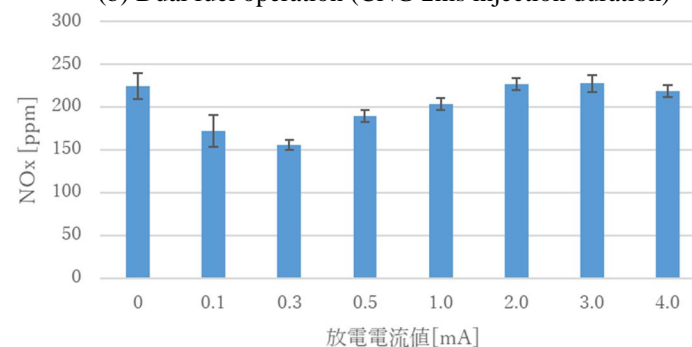
に関して、NO_x や CO₂ の処理は熱非平衡プラズマを発生させ、ラジカル分子を生成することで除去や低減されることが知られている。0.0~0.2 mAの間ではNO_x や CO₂ の値は減少傾向にあることが確認された。しかし、0.2mA以上となると、コロナ放電によって生成されたラジカルによって燃焼性が向上し、NO_x や CO₂ は増加傾向にあることが確認された。

(3) Dual Fuels (DF)エンジンの燃焼室内放電実験

Fig.4.6 に二元燃料運転(天然ガス噴射時間 2ms と 3ms)での排ガス中の NO_x の測定値のグラフを示す。天然ガスを 2 ms で噴射した二元燃料運転では 0.1 mA から 2.0 mA の間で増加している。また、3 ms で噴射した二元燃料運転の場合では、放電を行うと NO_x 値は減少するという結果になった。NO_x の生成要因は 3 種類存在し、空気中の窒素分を原材料として生成されるサーマル NO_x と燃料中の窒素分を原材料とするフューエル NO_x、火炎帯で酸素原子が平衡値を超えて多量に存在することなどによって生成されるプロンプト NO_x がある。二元燃料運転(噴射時間 2 ms)での場合は、NO_x は増加しているにもかかわらず熱発生率は減少している。これは、0 ラジカルの生成速度が N ラジカルの生成速度に比べて高く、酸素の含有量は 3.5%以上のガスでは酸化反応が進行しやすく、放電を行うことによって NO_x の生成が進んだからであると考えられる。二元燃料運転(噴射時間 3 ms)の場合においては、NO_x 値も熱発生率もともに減少する結果となった。また、スパーク放電などの放電状態も二元燃料運転の場合には影響を及ぼしていると考えられる。



(b) Dual fuel operation (CNG 2ms injection duration)



(c) Dual fuel operation (CNG 3ms injection duration)

Fig.4.6 Change of NO_x emission in exhaust gas

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 案納 俊, 平井 彩加, 段 智久, 浅野 一郎	4. 巻 20
2. 論文標題 コロナ放電による排ガス成分の変化の推測に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 神戸大学大学院海事科学研究科紀要	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 案納 俊, 段 智久, 浅野 一郎, 山名 馨, 都築賢三朗, 置田 翔, 竹原 日隆
2. 発表標題 ディーゼル機関におけるプラズマ支援燃焼の適用に関する研究
3. 学会等名 第92回（令和4年）マリンエンジニアリング学術講演論文集, OS2-2, pp.141-142
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 都築 賢三朗, 山名 馨, 案納 俊, 浅野 一郎, 段 智久, 赤松 浩, 大嶋 元啓, 吉本 隆光
2. 発表標題 プラズマ支援燃焼を燃焼室内部で形成する試み
3. 学会等名 第91回（令和3年度）マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山名 馨, 都築 賢三朗, 案納 俊, 浅野 一郎, 段 智久, 赤松 浩, 大嶋 元啓, 吉本 隆光
2. 発表標題 プラズマ支援燃焼にむけた電極周りの現象解明 - 高圧静止場雰囲気および大気圧流動雰囲気における放電特性
3. 学会等名 第91回（令和3年度）マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kezaburo Tsuzuki , Kaoru Yamana , Shun Anno , Ichiro Asano , Hiroshi Akamatsu , Takamitsu Yoshimoto , Tomohisa Dan
2. 発表標題 Fuel combustion improvement by emitted plasma assistance -Trial with electrode configuration and their effects
3. 学会等名 International Conference on PAAMES/AMEC 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaoru Yamana , Kezaburo Tsuzuki , Shun Anno , Ichiro Asano , Hiroshi Akamatsu , Takamitsu Yoshimoto , Tomohisa Dan
2. 発表標題 Application of plasma assistance for internal combustion Engine -Discharge phenomenon under high pressure ambient conditions
3. 学会等名 International Conference on PAAMES/AMEC 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kakeru Okita, Tomohisa Dan, Ichiro Asano, Kaoru Yamana, Kenzaburo Tsuzuki, Shun Anno, Arisa Nakahara, Hiroshi Akamatsu, Takamitsu Yoshimoto, Mortohiro Osima
2. 発表標題 Improvement of Fuel Combustion by Discharge Plasma Assist -Addaption to Diesel and DF Engines
3. 学会等名 10th PAAMES & AMEC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>科学研究費補助金研究成果 https://www2.kobe-u.ac.jp/~tdan/GiA_R2.html</p>
--

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
研究分担者	赤松 浩 (Akamatsu Hiroshi) (10370008)	神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・教授 (54502)	
研究分担者	大嶋 元啓 (Osima Motohiro) (40511803)	富山県立大学・工学部・講師 (23201)	

	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
研究協力者	吉本 隆光 (Yoshimoto Takamitsu)		

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