

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04208

研究課題名（和文）微量化学種の導入による非定常噴霧燃焼空気エントレインメントの高応答制御

研究課題名（英文）High response control of air entrainment into unsteady spray combustion with a small amount of additives

研究代表者

小橋 好充 (Yoshimitsu, Kobashi)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：80469072

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：非定常噴霧火炎における空気導入量を制御し、高熱効率・低公害燃焼を実現するため、本研究では、微量のオゾンをしプロ式圧縮着火機関の吸気に添加する手法を提案した。本手法では、オゾンの分解によって生成した活性な酸素ラジカルを利用するため、酸素ラジカルが再結合する前の圧縮行程早期に炭化水素燃料を燃焼室内に供給し、さらに圧縮上死点近傍で残りの燃料を噴射する。実機試験の結果、早期噴射の燃料量およびオゾン添加量を変化させ、上死点近傍で噴射した燃料噴霧の着火を制御することで、噴霧火炎内への空気導入量を制御可能であること、およびこの手法による高熱効率・低公害燃焼が実現可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非定常噴霧の着火燃焼を実現する熱機関において、有害排出物質の低減と高熱効率化の両立は重要な課題である。これを解決するため、本研究では、噴霧火炎内部への空気導入量を高応答に制御する手法を構築した。その手法は微量化学種を起点とする化学反応を燃料の早期噴射という物理的手段で制御する点で学術的に新規性があり、実機関にも展開可能な技術という点で産業応用が可能であり、社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：To control the ignition of unsteady fuel spray and the air-entrainment into its spray flame, ozone was introduced into the intake air in a compression ignition engine. A two-stage fuel injection with very early injection and late injection close to top dead center was adopted to utilize O-radicals decomposed from the ozone before the recombination reaction reduces them to oxygen molecules. The experimental results with variations of the first injection quantity and the ozone concentration demonstrated that the ignition delay of the fuel spray injected near top dead center and the amount of air entrained into its fuel spray flame can be controlled, and that engine operations achieving high thermal efficiency and low exhaust emissions simultaneously are possible with the proposed method.

研究分野：熱工学

キーワード：Ozone Spray combustion Compression ignition Air entrainment

### 1. 研究開始当初の背景

間欠的な非定常噴霧の着火燃焼を利用する熱機関においては、噴霧内部の過濃混合気によるススの生成抑制および噴霧外縁の高温拡散火炎による窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ ) の生成抑制が課題である。また、燃焼完結性を維持しつつ、熱損失を低減し、一層の熱効率向上を図るためには火炎温度の制御が課題である。これらの課題解決のために、噴霧火炎内への空気導入量を任意に増減可能で、機関の運転条件に応じて燃料-空気混合気の濃度を最適化し得る手法が求められている。

これまでの研究から、本燃焼形態の主たる空気導入部は燃料噴射孔から火炎形成位置までの領域 (着火準備区間) であることがわかっている。この領域は低雰囲気温度および低酸素濃度において拡大するものの、それには熱効率の低下や酸素不足によるススの増加などのデメリットが存在するほか、機関運転条件の変化に高速に対応できない等の課題があった。一方、着火準備区間の長さや混合気の化学反応特性には密接な関係があると考えられる。その報告例が少ない中で、申請者は燃料着火性と着火準備区間長さの強い相関を確認している (COMODIA, 2012)。これは燃料の化学反応速度を制御することで着火準備区間を能動的に変化させ得ることを示唆するものである。

以上のことから、本研究では活性化学種であるオゾンをごくわずかに導入することで、着火準備区間を高応答かつ広範囲に制御可能な新規燃焼法を構築するとともに、それによる高熱効率・低公害燃焼を実現することとした。

### 2. 研究の目的

本研究では以下の解明を目的とした。

- (1) オゾンの添加が炭化水素燃料の化学反応過程に及ぼす影響およびそのメカニズムの解明
- (2) オゾンと燃料噴射方式による着火準備区間の制御方法
- (3) (1)、(2)を勘案した高熱効率・低公害燃焼の実現可能性

### 3. 研究の方法

#### (1) 化学反応動力学計算によるオゾンの活用方法の検討

ゼロ次元の化学反応動力学計算により、オゾン添加による着火促進効果を検討した。計算にはCHEMKIN-Proを用いた。化学反応モデルにはCurranらのオクタン価標準燃料 (n-ヘプタンとi-オクタンの混合物) のモデル (Combust Flame, 2002) にMohammadiらのオゾンスキーム (SAE Paper 2006-01-0419) を組み込んで用いた。

#### (2) 単気筒圧縮着火機関による実験的検証

実験には、ボアおよびストロークが98mmおよび110mmの単気筒圧縮着火機関を用いた。圧縮比は17.6の汎用ディーゼル機関相当であり、燃焼室はトロイダル形である。

図1に実験系の概要を示す。供試機関の吸気には過給機および電気ヒータが設置されており、吸気流量および吸気温度が制御可能である。排出ガスの一部は再循環経路を通じて、吸気に還流することができる。機関のシリンダヘッドにはピエゾ式圧力センサが取り付けられており、その出力信号をクランク角度信号と同期してトランジェントメモリボードに記録した。吸気および排気中の全炭化水素 (THC)、一酸化炭素 (CO)、窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ ) および酸素 ( $\text{O}_2$ ) の各濃度は、排ガス分析計で計測した。排ガス中の黒煙はボッシュ式スモークメータにより計測した。

燃料の噴射にはコモンレール式燃料噴射装置を用いた。インジェクタはソレノイド駆動型であり、燃料噴射ノズルには噴孔直径0.125mmの8噴孔ノズルを用いた。

クランク角度に基づき噴射時期を制御しており、多段階の燃料噴射が可能となっている。

オゾンは、酸素を原料としてオゾナイザにより生成し、オゾンモニタでオゾン濃度を計測した後、機関の吸気に導入した。

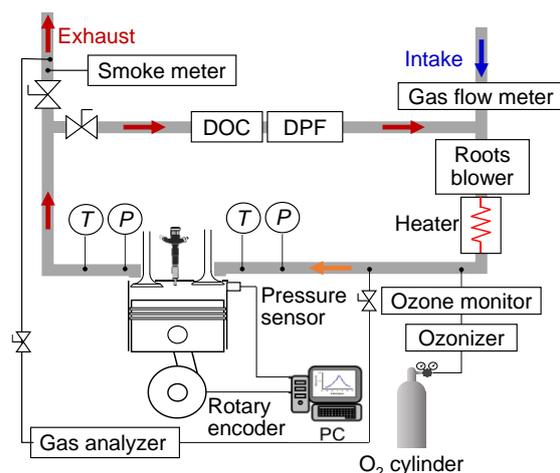


図1 実験系の概要図

#### 4. 研究成果

##### (1) オゾン添加が炭化水素の着火に及ぼす影響

CHEMKIN-Pro の IC HCCI (予混合圧縮着火) モデルを用いて、オゾン添加が炭化水素の着火に及ぼす影響を検討した。

図 2 は、燃焼室内に空気と 110ppm のオゾンを充填した際の、1 サイクルの圧縮膨張行程における温度(上段)およびオゾン( $O_3$ )濃度、酸素ラジカル( $O$ )濃度、ならびに酸素濃度の変化量( $\Delta O_2$ )である。オゾンは 500K から 600K の雰囲気温度で分解し、 $O_3 = O_2 + O$  により酸素分子と酸素ラジカルを生成するが、生成した酸素ラジカルは間もなく再結合し、酸素分子となる。

図 3 は、燃焼室内にオクタン価 90 のオクタン価正標準燃料を当量比 0.16 で充填した際の、1 サイクルの圧縮膨張行程におけるオゾン濃度(上段)、温度(中段)および OH ラジカル濃度(下段)であり、黒色の破線がオゾン添加無し、青色の実線が 110ppm のオゾン添加有り、の履歴である。オゾンを添加すると、圧縮行程の早い段階から OH ラジカルが生成される。その濃度は、オゾンを添加しない場合に炭化水素燃料の低温酸化反応から生ずる濃度と同等であり、110ppm とごく微量のオゾンであっても炭化水素が生ずる程度の OH ラジカルを生成することがわかる。さらに、オゾンを添加した条件では、高温酸化反応に至っている。

以上のことから、オゾンを有効に利用するためには、燃焼室内温度がオゾンの分解温度である 500K から 600K に達するまでに、炭化水素燃料を共存させる必要があることが示された。

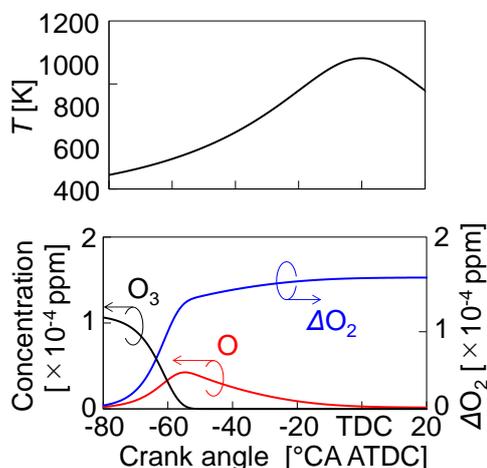


図 2 オゾンを添加した空気の圧縮膨張行程における温度(上段)、オゾン( $O_3$ )濃度、酸素ラジカル( $O$ )濃度、および酸素濃度の変化量( $\Delta O_2$ )(下段)  
( $O_3=110\text{ppm}$ )

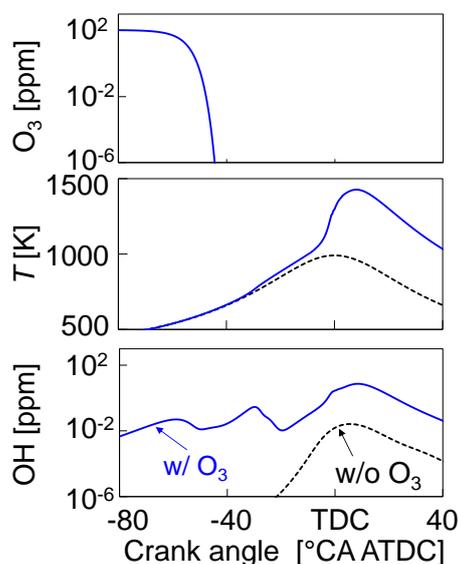


図 3 オゾンを添加したオクタン価正標準燃料混合気の圧縮膨張行程におけるオゾン( $O_3$ )濃度(上段)、温度(中段)、および OH ラジカル濃度(下段)  
(オクタン価 90,  $O_3=110\text{ppm}$ )

##### (2) オゾン添加による着火制御および高熱効率・低公害燃焼の実証

単気筒圧縮着火機関において、オゾン添加時の着火・燃焼特性を解析することで、間接的に噴霧燃焼の主たる空気導入部(着火準備区間)に及ぼすオゾン添加の影響を検討した。特に、前節の結果を考慮して、燃料の一段目筒内直接噴射をオゾンが分解する前に行い、二段目筒内直接噴射を上死点近傍とする方式に着目した。さらに、オゾン濃度、二段目筒内直接噴射時期および一段目と二段目の燃料量割合を変化させることで、高熱効率・低公害燃焼を実現し得る条件を検討した。

表 1 に実験条件を示す。燃料はオクタン価 90 のオクタン価正標準燃料(PRF90)であり、これを噴射圧力 80MPa で筒内に直接噴射した。機関回転速度は 1200rpm とした。排ガス再循環(EGR)および過給を併用するとともに、吸気管のヒータにより温調することで、吸気温度  $60^\circ\text{C}$ 、吸気圧力 120kPa、吸気酸素濃度 15%を一定に保った。一段目の噴射時期は、オゾンが分解するより早い上死点前 68 度とした。二段目の噴射時期は上死点前 6 度から上死点後 6 度とし、オゾン濃度を 0ppm から 360ppm まで変化させた。一段目噴射の燃料量割合は 20%から 60%まで変化させたが、総供給燃料量は一定に保った。その際の図示平均有効圧力は、条件にもよるが、およそ 0.67 MPa であった。

表 1 実験条件

Fuel	PRF90
Engine rotation speed [rpm]	1200
Intake oxygen concentration [%]	15
Intake air temperature [°C]	60
Intake air pressure [kPa]	120
Intake O <sub>3</sub> concentration [ppm]	0 to 360
Fuel injection pressure [MPa]	80
First injection timing, $\theta_{inj,1st}$ [°CA ATDC]	-68
Second injection timing, $\theta_{inj,2nd}$ [°CA ATDC]	-6 to 6
Ratio of first injection quantity, $Q_{inj,1st}$ [%]	20 to 60
Total injection quantity [mg]	29
IMEP [MPa]	≈ 0.67

図 4 に、一段目噴射量割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) を 35%、二段目噴射時期を上死点として、オゾン濃度を変化させた際の圧力(上段)および熱発生率(下段)を示す。本実験条件においては、オゾン添加がないと機関の回転速度を維持するための十分な発熱量が得られないのに対し、オゾン添加すると、上死点近傍に一段目噴射燃料の高温酸化反応による熱発生が現れ、上死点後 5 度以降に二段目噴射燃料による高い熱発生率を生じる。さらに、オゾン濃度を増大すると、一段目噴射燃料の高温酸化反応の位相が進角するとともに、その熱発生率が増大し、オゾン添加によって二段目噴射燃料の着火(熱発生率が上昇を開始する時期)が進角している。

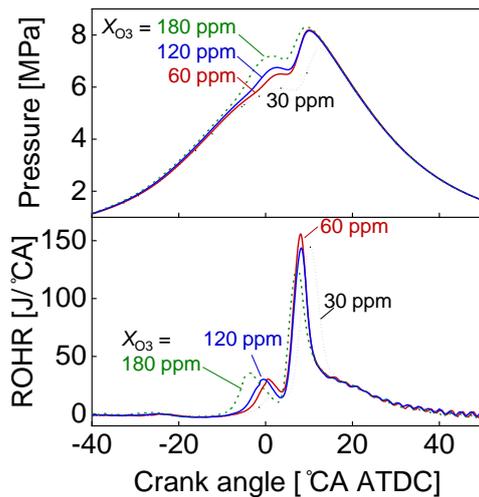


図 4 オゾン添加による圧力および熱発生率履歴の変化

( $Q_{inj,1st}=35\%$ ,  $\theta_{inj,2nd}=TDC$ )

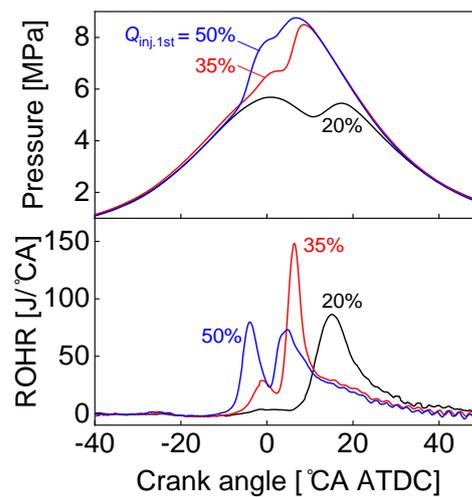


図 5 一段目燃料噴射割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) による圧力および熱発生率履歴の変化

( $X_{O_3}=120\text{ppm}$ ,  $\theta_{inj,2nd}=-4^\circ\text{CA ATDC}$ )

図 5 に、オゾン濃度を 120ppm、一段目噴射時期を上死点前 4 度として、一段目噴射量割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) を 20% から 50% まで変化させた際の圧力(上段)および熱発生率(下段)を示す。一段目噴射燃料の高温酸化反応は、位相、熱発生率ともに一段目噴射量割合の影響を大きく受けており、一段目噴射量割合の増大にともない、二段目噴射燃料の着火が大幅に進角している。

図 6 に、最も高い図示熱効率が得られる二段目噴射時期において、一段目噴射量割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) およびオゾン濃度を変化させた際の図示熱効率 ( $\eta_i$ ) および燃焼効率 ( $\eta_{comb}$ ) を示す。図 5 に示したとおり、一段目噴射量割合を変化させることで二段目噴射燃料の着火遅れを大きく変化させることが可能であるが、一段目噴射量割合の低下は、燃焼効率の低下、ひいては図示熱効率の低下を引き起こす。それに対し、一段目噴射量割合が低いほど、多くのオゾン添加することによって高い燃焼効率と図示熱効率を保つことが可能になっている。

図 7 に、全実験点を対象として、二段目噴射燃料の着火遅れ ( $\tau_{ign,2nd}$ ) に対する黒煙の排出濃度の関係を示す。図 6 の実験点は中途りの記号として示している。同一の一段目噴射量割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) に対しても、二段目噴射時期ならびにオゾン濃度により、二段目噴射燃料の着火遅れを変化させることは可能である。特に、一段目噴射量の低い条件では、オゾン濃度の増加に対する

着火遅れの短縮効果が大きい。また、一段目噴射量割合によっても二段目噴射燃料の着火遅れは大幅に変化することから、オゾン濃度、燃料噴射条件を変化させることにより、図7のように、二段目噴射燃料の着火遅れを広範に制御可能である。さらに、着火遅れが長期化するほど黒煙の排出濃度が低下していることから、二段目噴射燃料の着火遅れとその噴霧内部への空気導入量には高い相関があることが明らかである。

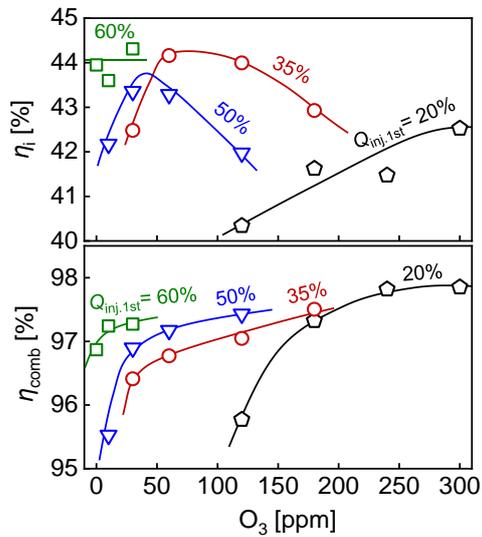


図6 一段目燃料噴射割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) およびオゾン濃度に対する図示熱効率 ( $\eta_i$ ) および燃焼効率 ( $\eta_{comb}$ ) (最高図示熱効率を得られる二段目噴射時期)

図8に、図6と同一条件における黒煙および窒素酸化物 ( $NO_x$ ) の濃度を示す。一段目噴射量割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) を35%以下にすると二段目噴射燃料内への空気エントレインを高めることで、黒煙および  $NO_x$  の同時低減が可能となる。さらに、図6もあわせると、一段目噴射量割合35%で適量のオゾンを導入することで、高熱効率と低公害な燃焼を実現できることが明らかとなった。

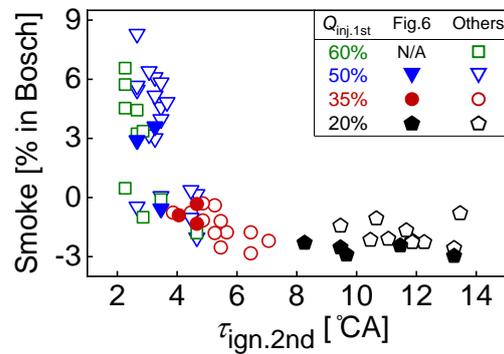


図7 二段目噴射燃料の着火遅れ ( $\tau_{ign,2nd}$ ) に対する黒煙濃度 (全実験点)

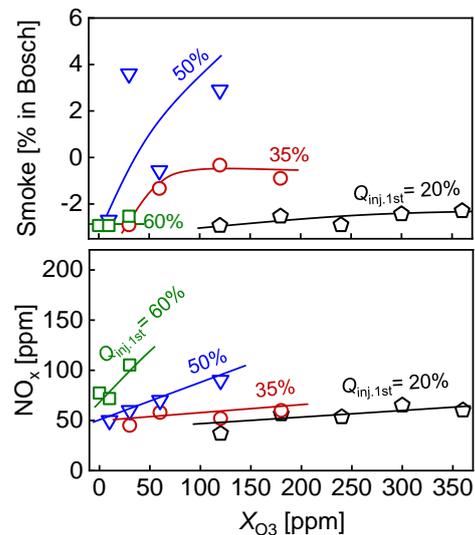


図8 一段目燃料噴射割合 ( $Q_{inj,1st}$ ) およびオゾン濃度に対する黒煙および  $NO_x$  (最高図示熱効率を得られる二段目噴射時期)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kobashi Yoshimitsu, Dan Da Tu Dan, Inagaki Ryuya, Shibata Gen, Ogawa Hideyuki	4. 巻 first published online
2. 論文標題 Optimization of gasoline compression ignition combustion with ozone addition and two-stage direct-injection at middle loads	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Engine Research	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/1468087420984574	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tu Dan Dan Da, Ryuya Inagaki, Yoshimitsu Kobashi, Gen Shibata and Hideyuki Ogawa
2. 発表標題 Improvements in Gasoline Compression Ignition Combustion with Ozone Addition and Two-stage Direct Fuel Injection
3. 学会等名 第31回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshimitsu Kobashi, Ryuya Inagaki, Gen Shibata and Hideyuki Ogawa
2. 発表標題 Improvements in Thermal Efficiency and Exhaust Emissions with Ozone Addition in a Natural Gas Dual-Fuel Engine
3. 学会等名 The 10th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2022) (国際学会)
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
---------	---------