

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560798

研究課題名（和文） 船用燃料の高濃度排ガス再循環燃焼法

研究課題名（英文） Combustion Method of Marine Fuel with High Rate of Exhaust Gas Recirculation

研究代表者

畔津 昭彦（AZETSU AKIHIKO）

東海大学・工学部・教授

研究者番号：80184175

研究成果の概要（和文）：船用ディーゼル機関の排ガス再循環を想定した種々の雰囲気条件で、燃料の着火・燃焼特性を、可視化燃焼実験と排ガス計測実験を通じて系統的に検討した。酸素濃度 10%以下と言う高濃度排ガス再循環相当の低酸素濃度雰囲気中で、NO<sub>x</sub>、PM（すす）、CO を同時低減可能な条件があることを確認した。また NO<sub>x</sub> には雰囲気中の酸素の割合が、CO とすすには雰囲気中の酸素量が支配因子であり、さらにすすには燃料噴射期間が影響を与えていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A systematic experimental research were conducted to clarify the ignition and combustion characteristics of fuel under the ambient conditions equivalent to the in-cylinder conditions of marine diesel engine with heavy exhaust gas recirculation. It is confirmed that the simultaneous reduction of NO<sub>x</sub>, Soot and CO can be achieved under a low O<sub>2</sub> concentration condition, i.e., lower than 10%. The O<sub>2</sub> fraction is a dominant factor of NO<sub>x</sub> emission and the amount of O<sub>2</sub> is a dominant factor for both of Soot and CO emissions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
平成 23 年度	600,000	180,000	780,000
平成 24 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船用機関・燃料、ディーゼル燃焼、排ガス再循環、低酸素

## 1. 研究開始当初の背景

近年の環境問題からディーゼル機関の低公害化が強く要求され、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、すすなどの微粒子（PM）の大幅な削減が必要とされている。これに対して、船用ディーゼル機関に対する規制値はまだ甘く遅れていたが、現状の規制値から 30%～80%削減することを要求する第 2 次及び第 3 次規制が検討

され、今後発効が予定されている。このような社会的要求を踏まえ、船用ディーゼル機関に対する NO<sub>x</sub> 低減技術が精力的に研究開発されている。具体的には、電子制御燃料噴射の採用による燃焼の最適化や、エマルジョン燃料、水噴射や給気加湿などの水の有効利用、さらには後処理装置として選択還元型の脱硝触媒（SCR）が有望と考えられ、それぞれ

基礎面と応用面から研究が進められている。

NO<sub>x</sub> 削減技術としては、これらの他に排ガス再循環 (EGR) が有効である。EGR とは吸気の一部を排ガスで置換することにより燃焼温度を低下させ、低 NO<sub>x</sub> 化させる手法であり、自動車用機関では 20-30% の置換率ではあるが既に実用化されている。今後、さらなる NO<sub>x</sub> 削減のために、より高濃度の EGR の利用が期待されており、その基礎研究が始まった段階である。

このように有望な技術であるにもかかわらず、船用機関での採用は検討されたことが無いと言って過言ではない。これは燃料の重油 (A 重油および C 重油) に含まれる硫黄分から SO<sub>x</sub> が生成され、それが吸気を介してシリンダ内に再導入されることにより、シリンダ・ピストンに硫酸腐食等を発生させるためである。しかし NO<sub>x</sub> 規制の厳格化に呼応して、低硫黄の重油の使用を義務付ける動きが始まり、NO<sub>x</sub>80%削減を要求する特定海域ではその上限を 1000ppm とすると言う提案がかたまりつつある。このような低硫黄燃料が船用ディーゼル機関で採用されるようになると、EGR の採用も十分に可能性がある。しかし EGR が重油のディーゼル燃焼に与える影響など、必要な知見が殆ど無いのが実状である。

著者らは以前の研究で、EGR の各ガス成分がディーゼル燃焼に与える影響を系統的に検討してきた。またこれらの研究の発展として、高濃度の排ガス再循環場のような低酸素濃度雰囲気においては、火炎温度が顕著に低下すると共に火炎中のすす量も大幅に低下する新しい燃焼モードが出現することを確認した。これらの過去の研究で得られた知見を組み合わせることにより、重油等の船用燃料においても、EGR を適切かつ効果的に作用させれば、低 NO<sub>x</sub>、低 PM の燃焼を実現できるのではないかと考えたのが本研究の発端である。

## 2. 研究の目的

本研究では重油等を使用する船用ディーゼル機関において、排ガス再循環 (EGR) を用いた低環境負荷燃焼法の可能性を検討することが目的である。実機に EGR を採用した場合は、吸気中に CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等の 3 原子分子が増えることにより、まず圧縮温度の低下が生ずる。またこれらの比熱が高いことによる燃焼温度の低下や、燃焼場での CO<sub>2</sub> 解離による温度低下などが重畳すると共に、一方で酸素濃度低下による希釈効果や、圧縮温度の低下による着火遅れの増大などが複合的に生ずるなど、その影響は非常に複雑である。そこで本研究では、エンジンのシリンダ内と同等な雰囲気条件の単純化した場において系統的な実験を行い、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等の雰囲気組成、雰囲気条件、燃料噴射条件などが船用

燃料の非定常噴霧燃焼特性に及ぼす影響を明確にする。この結果を踏まえて、高濃度排ガス再循環による低 NO<sub>x</sub>、低 PM (すす) の新しい燃焼モードが実現可能な雰囲気条件、噴射条件を同定することを目的とする。

## 3. 研究の方法

燃焼実験は、エンジンシリンダ内と同等な雰囲気条件を実現できる高温高压容器内の単純化した場において実施することとし、燃焼系、可視化系、計測系の同期システム、および排ガスの計測システムを整備した。実験には可視化窓を備えた高温高压容器と小型の高温高压容器の 2 種類を使用し、それぞれにおいて可視化燃焼実験と排ガス計測実験を行った。

可視化燃焼実験装置の概要を図 1 に示す。噴射システムは、燃料をあらかじめ一定圧力に蓄圧し、ノズル針弁のリフト量をピエゾアクチュエータで直接制御する形式になっている。この圧力容器内で希薄酸素予混合気を燃焼させ、実際のディーゼルエンジンの燃焼室と同等の雰囲気条件を実現させた。予混合気は、水素、酸素、窒素からなり、初期混合比は、水素燃焼後の酸素の量が所定の体積分率になるように設定した。スパーク点火により水素燃焼させた後、目標の雰囲気圧力に達する時刻に容器上面の噴射装置から燃料を鉛直下方に噴射し、自由噴霧燃焼させた。容器には光学的計測と画像二色法のため、直径 80mm の可視化用窓ガラスが設置されている。燃焼時には火炎をカラーハイスピードビデオカメラで撮影し、二色法を用いて火炎の温度とすす発生の分布状況を解析した。

一方排ガス計測燃焼実験装置の概要を図 2 に示す。小型の高温・高压容器を用いており、容器内体積を小さくすることにより、指圧線

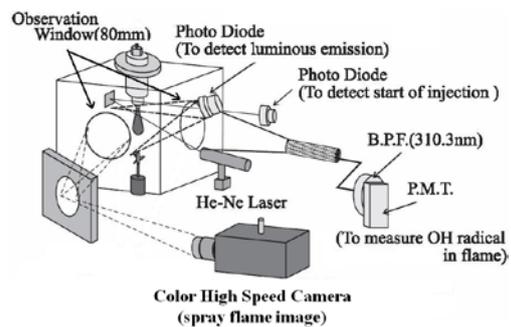


図 1 可視化燃焼実験装置

図解析から熱発生率を計測できるようにしている。高温高压雰囲気は前と同様に水素を用いた希薄予混合燃焼方式を採用した。燃料噴射装置には、中型トラックに使用されているソレノイド方式のコモンレール噴射系を使用した。燃焼によって生成された排ガスはサンプリングバッグに収集し、NO、CO 等の濃度を測定した。

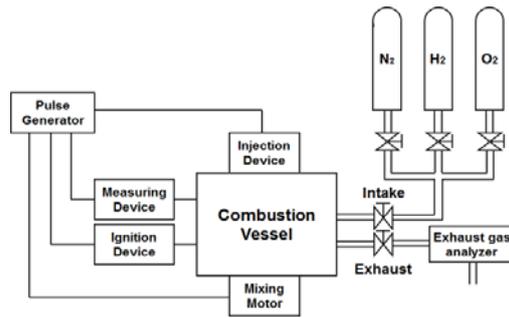


図2 排ガス計測燃焼実験装置

#### 4. 研究成果

この実験システムを用いて、軽油を燃料とし、霧囲気温度・圧力、燃料噴射圧力を一定とした条件で、霧囲気中の O<sub>2</sub> 濃度を低酸素側に大幅に変化させた実験を行い、NO<sub>x</sub>、CO などの有害排ガスの排出傾向と、火炎中のすすの生成状況、火炎温度について検討した。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 酸素濃度の低下に伴い NO<sub>x</sub> は低下する。一方、一定酸素濃度以下になると CO の排出が生じ、低酸素濃度になるにつれて顕著となる。

(2) 可視化燃焼実験結果によると、低酸素濃度になると火炎温度が低下し(図3)、これが低 NO<sub>x</sub> 化の原因になっているものと判断された。一方火炎中のすす量は酸素濃度の低下に伴い増加するが、一定酸素濃度より低くなると減少に転じ(図4)、低酸素濃度場ではほとんどすすが発生しない噴霧燃焼が可能である。

(3) 火炎中にすすが発生せず、NO<sub>x</sub>、CO が排出しない噴霧燃焼が可能な酸素濃度域が存在する。なお霧囲気に CO<sub>2</sub> を添加すると、この酸素濃度域の範囲が狭くなる。(図5)

これらの結果を踏まえて、霧囲気酸素濃度と共に霧囲気圧力の影響を検討した。これは酸素の割合(分率)と酸素の量(濃度)のいずれが影響を支配するか検討するためである。その結果、以下の知見を得た。

(1) 霧囲気圧力が着火遅れに及ぼす影響は低酸素濃度側でやや大きくなる。燃焼期間についても、高酸素濃度側では霧囲気圧力の影響は小さいが、低酸素濃度側では影響が大きくなり、高圧になるほど燃焼期間は短期化する(図6)。

(2) 可視化燃焼実験結果によると、同一酸素分率の条件では霧囲気圧が高圧になるほど火炎中のすす量が低下する。一方、火炎温度には大きな変化は無く、すす量は霧囲気中の酸素濃度の影響が大きく、一方火炎温度は霧囲気の酸素分率に主として支配されていることが分かった。

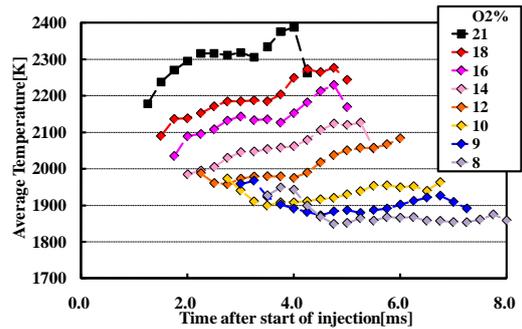


図3 酸素濃度による火炎温度の変化

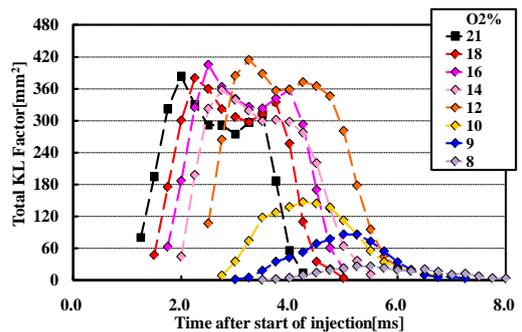


図4 酸素濃度によるすす量(KL)の変化

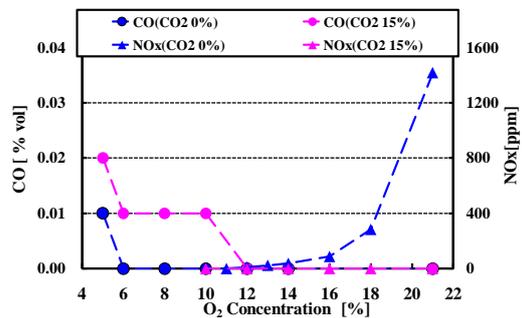


図5 NO と CO の同時低減領域

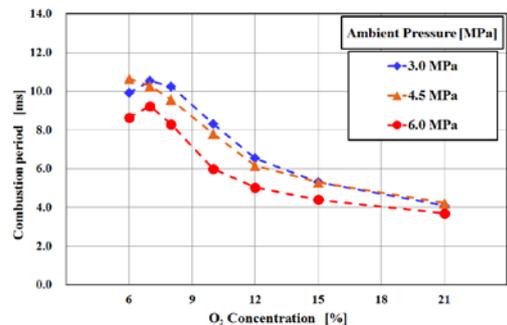


図6 霧囲気圧が燃焼期間に及ぼす影響

(3) 排ガス計測結果によると、NO<sub>x</sub> の排出特性には霧囲気圧力の影響は小さく、一定酸素分率以下では排出されなくなる。一方 CO に

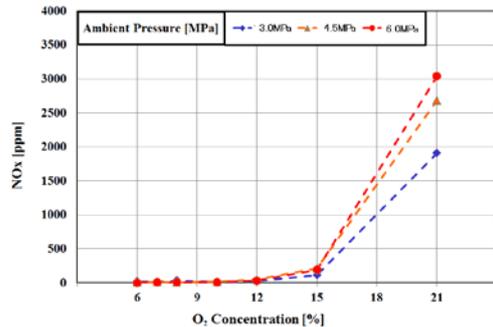


図7 雰囲気圧のNOx 排出への影響

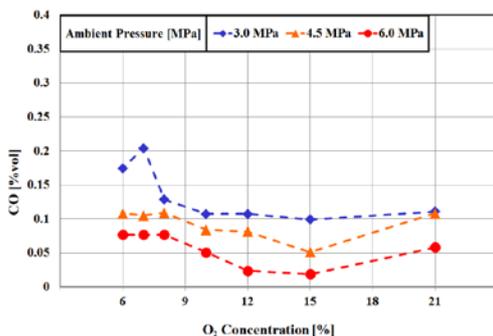


図8 雰囲気圧のCO 排出への影響

については、排出量が急増する酸素分率は、雰囲気気圧の高圧化に伴い低酸素分率側に移行し、酸素の量が影響を支配していることが分かった。

これらの結果を踏まえ、すす低減の原因を検討するために、酸素濃度と共に燃料噴射期間を大幅に変化させて実験を行った。その結果、燃料噴射期間は噴霧燃焼時の熱発生率パターンに大きな影響を及ぼすこと、また噴射期間が着火遅れと同程度以下になると、熱発生率が予混合燃焼的な形状になることが明らかになった。この熱発生率形状になる領域では、CO、NOx 共にその排出率が低くなり、それ以外の領域と大きく異なることが明らかになった。火炎の可視化実験の結果、火炎温度の変化はNOx 排出率の傾向を良く説明できるものであり、また火炎中のすすの生成傾向もCO 排出率と良く一致した。これらの結果から、すす低減に及ぼす噴射期間短期化の影響は酸素濃度低下による影響と似た傾向であり、噴射期間と着火遅れの関係が非常に重要であることが明らかになった。これらの知見を踏まえると、低NOx、低PMの燃焼を実現するための重要事項と検討課題が明確になり、本研究の所期の目標が達成できたものと考えている。

## 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)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 齋藤洸・長嶋陽平・山本慶・畔津昭彦，低酸素濃度場における噴霧燃焼に関する研究 (雰囲気気圧と酸素濃度が燃焼・排ガスに及ぼす影響)，第23回内燃機関シンポジウム，2012年10月，札幌。
- ② 齋藤洸・山本慶・長嶋陽平・畔津昭彦，低酸素濃度場における噴霧燃焼に関する研究 (雰囲気気圧と酸素濃度が燃焼・排ガスに及ぼす影響)，日本機械学会2012年度年次大会，2012年9月，金沢。
- ③ 長嶋陽平・田口智也・畔津昭彦，低酸素濃度場における噴霧燃焼特性に関する研究 -CO2 添加が燃焼，排ガスに及ぼす影響-，第22回内燃機関シンポジウム，2011年11月，東京。
- ④ 長嶋陽平・田口智也・畔津昭彦，低酸素濃度場における噴霧燃焼特性に関する研究 (CO2 添加がNOx，すす，COの同時低減に与える影響)，日本機械学会2011年度年次大会，2011年9月，東京。
- ⑤ 山本慶・畔津昭彦，低酸素濃度場における噴霧燃焼特性に関する研究 (低酸素濃度場における熱発生率の検討)，日本機械学会2011年度年次大会，2011年9月，東京。
- ⑥ 田口智也・長嶋陽平・畔津昭彦，低酸素濃度場における噴霧燃焼特性に関する研究 -NOx，すす，COの同時低減条件の検討-，第21回内燃機関シンポジウム，2010年11月，岡山。

[その他]

ホームページ等

[http://ns.mech.u-tokai.ac.jp/~azetsu\\_lab/](http://ns.mech.u-tokai.ac.jp/~azetsu_lab/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

畔津 昭彦 (AZETSU AKIHIKO)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：80184175