

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04946

研究課題名(和文) アンモニア及び軽油を用いた反応性制御圧縮着火燃焼の内燃機関適用に関する研究

研究課題名(英文) Study of a reactivity controlled compression ignition engine fueled with ammonia and diesel

研究代表者

仁木 洋一 (Niki, Yoichi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10511587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：温室効果ガス削減のために、代替燃料として期待されるアンモニア(NH<sub>3</sub>)を、ディーゼルエンジンにおいて、軽油とNH<sub>3</sub>を混焼する技術に関する研究開発を実施した。本研究では、NH<sub>3</sub>を燃料として利用した場合に生成される未燃NH<sub>3</sub>や亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の削減方法や機構の解明を目的として、実験とCFDを用いた数値計算を行った。その結果、軽油とNH<sub>3</sub>を混焼した場合の排気中成分の変化や、軽油の噴射時期の早期化が未燃NH<sub>3</sub>とN<sub>2</sub>Oの削減に対して有効であることが、実験により明らかになった。また、CFDを用いたエンジン内の燃焼解析により、噴射時期の早期化による未燃NH<sub>3</sub>とN<sub>2</sub>Oの削減機構を解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NH<sub>3</sub>は、カーボンフリー燃料として水素に比べて液化しやすい性質のため大量輸送や長期貯蔵に適しており、水素キャリアとして注目されている。さらに、NH<sub>3</sub>の直接燃焼についても発電や工業炉への利用に注目が集まっており、NH<sub>3</sub>を燃料として利用する技術開発による社会への波及効果は高いと考えられる。また、ディーゼルエンジンにおいて、温室効果ガスの排出削減を目的にNH<sub>3</sub>と軽油を混焼するためには、燃焼過程での軽油とNH<sub>3</sub>の相互作用や、NH<sub>3</sub>やN<sub>2</sub>Oなどの環境負荷物質の低減技術は必須である。本研究で得られた知見は、限られたものであるが、今後の研究開発に役立つものであると考えている。

研究成果の概要(英文)：To reduce CO<sub>2</sub> emissions from marine diesel engines, the use of ammonia (NH<sub>3</sub>) as an alternative fuel has been focused. This research studied NH<sub>3</sub>-diesel co-combustion.

Development of the combustion strategy for the mitigation of unburned NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions, which can be emitted NH<sub>3</sub> fueled engines, was conducted, and using computational fluid dynamics (CFD) simulation investigated the mechanism of the reduction of unburned NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emission. The experimental investigation using a single-cylinder diesel engine revealed emission characteristics and a decrease in unburned NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions through the implementation of early pilot fuel injection. Investigating the NH<sub>3</sub>-diesel combustion with a 3-D CFD simulation identified the mechanisms responsible for the reduction in unburned NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions achieved by employing early pilot fuel injection.

研究分野：内燃機関

キーワード：アンモニア 二元燃料 RCCI ディーゼル CFD OpenFOAM 代替燃料

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

船舶は、その大きさにもよるが、数千から数万 kW の出力が推進に必要であり、運搬する積荷と共に、1~2 週間程度連続して出力を得るために燃料を積載する必要がある。自動車等で実施されているような、燃料電池や二次電池を利用した二酸化炭素削減方法を船舶へ適用することは、それらの重量や体積当たりの出力を高めることができなければ難しい。そのため、船舶においては、代替燃料を使用することで効率的に二酸化炭素削減を達成することができると考えられる。代替燃料の中でも、アンモニア ( $\text{NH}_3$ ) は、水素原子を 3 つ含み、20 °C において蒸気圧力が 1 MPa 程度と液化しやすい特徴がある。液化  $\text{NH}_3$  は、同体積の液化水素の約 1.5 倍の水素を保持することができ、船舶によりすでに大量輸送が実施されている物質である。このような特徴が着目され、水素エネルギーの輸送・保存媒体として利用することを目的に、より高効率な水素からの  $\text{NH}_3$  合成方法や  $\text{NH}_3$  からの水素生成方法、 $\text{NH}_3$ -空気予混合気の燃焼過程の解明、ガスタービンや内燃機関を用いた直接燃焼による  $\text{NH}_3$  利用などの研究開発が実施されている。 $\text{NH}_3$  は、水素と同様に燃焼しても二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) を排出しないため、水素に変換せずに使用することにより、効率的に利用することができる代替燃料として注目されている。

申請者らは、 $\text{NH}_3$  を船用ディーゼル機関の代替燃料として利用する研究開発を実施している。これまでに、 $\text{NH}_3$  ガスを吸気に混合し燃料として利用することで軽油消費量を削減し、 $\text{CO}_2$  の排出削減を実現した。しかし、炭化水素燃料に比べて着火温度が高く燃焼速度が遅く反応性の悪い  $\text{NH}_3$  を、吸気に混合し濃度の薄い状態で燃焼させた場合、未燃の  $\text{NH}_3$  や燃焼時の中間生成物であり温室効果を持つ亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) が排出されることを同時に確認している。一方、未燃  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{O}$  の低減方法として軽油の早期噴射が有効であること及び後処理装置による未燃  $\text{NH}_3$  と  $\text{NO}_x$  の低減を確認している。

### 2. 研究の目的

本研究では、液化  $\text{NH}_3$  をディーゼル機関の吸気に噴射することで、 $\text{NH}_3$  と空気の混合気をエンジンに供給する。この方式の課題は、 $\text{NH}_3$  と空気の混合気の着火と燃焼である。本研究では、圧縮行程の早い時期に燃焼室内に軽油を噴射し  $\text{NH}_3$  と空気と軽油の混合気を形成することで、反応性を調整し、 $\text{NH}_3$  と空気と軽油の混合気の着火を制御する。この手法により、未燃  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{O}$  の排出量を増加させないで、より多くの  $\text{NH}_3$  をディーゼル機関で燃焼させる燃焼条件を、実験用ディーゼル機関及びディーゼル噴霧モデルと化学反応計算を組み合わせた数値計算により明らかにする。

本研究課題の核心は、炭化水素- $\text{NH}_3$ -空気予混合気の着火・燃焼現象を理解し、それを内燃機関に適用することにある。炭化水素- $\text{NH}_3$ -空気予混合気の燃焼は、炭化水素と  $\text{NH}_3$  がお互いに影響するため、単一燃料予混合気の燃焼よりも複雑であり、ディーゼル機関での利用の観点から燃焼現象を解析することは、学術的に有意義である。また、本件研究で用いる手法は、反応性制御着火 (Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI)) 燃焼と呼ばれ、燃料を内燃機関に最適な着火・燃焼特性を持つように最適化する手法である。

### 3. 研究の方法

実験においては、液化  $\text{NH}_3$  をエンジンの吸気に噴射することで、 $\text{NH}_3$  と空気の混合気をエンジンに供給する。その後、軽油を吸気行程もしくは圧縮行程中に燃焼室内の  $\text{NH}_3$  と空気の混合気中に噴射することで、RCCI 燃焼により混焼を行い、軽油の噴射量及び噴射タイミング等をパラメータとして、筒内圧力、燃料消費率、排気ガス成分の測定を行う。筒内圧力を解析することでエンジン内の燃焼の評価を行う。

数値計算においては、ディーゼル噴霧モデルと化学反応計算を組み合わせることで、雰囲気温度・圧力や軽油の噴射量・タイミングが炭化水素- $\text{NH}_3$ -空気予混合気の着火や燃焼速度に及ぼす影響を調べる。実験結果及び数値計算結果から、未燃  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{O}$  の排出量を低減可能な燃焼条件を明らかにする。

### 4. 研究成果

初年度は、ディーゼル機関の給気にガス状のアンモニア ( $\text{NH}_3$ ) を供給することで、軽油と  $\text{NH}_3$  の混焼運転を行った。 $\text{NH}_3$  混焼率 (軽油と  $\text{NH}_3$  の供給熱量の合計に対する  $\text{NH}_3$  の熱量比率) は最大で 69% であり、今年度の目標である混焼率 50% を達成した。ガス状であっても  $\text{NH}_3$  を十分な量が供給できることが明らかになったので、本研究の主目的である軽油と  $\text{NH}_3$  を用いた RCCI (反応性制御圧縮着火) 燃焼の実験を優先して実施した。そのため、 $\text{NH}_3$  を液状で供給する装置の製作は次年度に延期することとした。軽油と  $\text{NH}_3$  を用いた RCCI 燃焼の実験においては、 $\text{NH}_3$  混焼率約 45% 一定として、軽油の噴射時期を、-10 から -65 度 BTDC (上死点前) まで進角して機関性能・排ガス組成を測定した。その結果、排ガス中の未燃  $\text{NH}_3$  と温室効果を持つ亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) が、-35 度 BTDC (上死点前) より進角することで、減少することを確認した。これは、軽油が燃焼室内に分散し  $\text{NH}_3$  の燃焼反応を促進したためであると考えられた。また、既存

の文献の報告と比較した結果、軽油の進角による燃焼の変化は、従来の軽油の噴霧拡散燃焼の形態から、予混合燃焼主体の燃焼に変化していることが予測された。さらに、軽油噴射時期を-45度 BTDC に進角した状態で、軽油の噴射量と NH<sub>3</sub> の噴射量を変更して試験をした結果、軽油と NH<sub>3</sub> は、それぞれ反応性の高い燃料と低い燃料として働くことで、RCCI 燃焼を実現し着火のタイミングや燃焼速度を、ある程度操作できうることを確認した。今年度の成果として、上述の実験結果を基に軽油による NH<sub>3</sub> の燃焼促進効果と軽油と NH<sub>3</sub> による RCCI 燃焼の有効性を報告する国内発表 2 件行い、論文を米国機械学会 Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 誌に投稿し受理された。

2 年度目は、昨年度から引き続き、ディーゼル機関の給気にガス状のアンモニア (NH<sub>3</sub>) を供給することで、軽油と NH<sub>3</sub> を用いた RCCI 燃焼を用いてエンジンを運転した。また、エンジン内の軽油と NH<sub>3</sub> の燃焼を解析するために、流体数値計算ソフト (OpenFOAM) を用いた研究開発を実施した。さらに、NH<sub>3</sub> を液状で供給する装置を製作し、液化 NH<sub>3</sub> をディーゼル機関の給気に供給することで軽油と NH<sub>3</sub> の混焼運転を実施した。

ディーゼル機関を用いた実験では、混焼率 45% 程度において、RCCI 燃焼によって未燃 NH<sub>3</sub> や温室効果ガスである N<sub>2</sub>O を低減させたまま、軽油の噴射回数を 2 回に分割することで、排気中の一酸化炭素や未燃炭化水素を低減する効果が得られることを確認した。関連する成果を米国機械学会が主催する国際学会 (ICEF2021) にて発表した。

流体数値計算ソフトを用いた解析では、エンジン内の燃焼室のモデルを作成し、軽油相当の着火性を持つヘプタンを燃料として、エンジン内の燃焼を模擬する計算を行った。その結果、燃料の着火・燃焼による筒内圧力の変化において実験結果と概ね一致した。また、ヘプタンと NH<sub>3</sub> を混合した場合の燃焼反応を模擬するために、ヘプタンと NH<sub>3</sub> の化学反応機構の組合せに着手した。

NH<sub>3</sub> を液状で供給する装置を製作・設置し、確認のため混焼率 70% 程度において軽油と NH<sub>3</sub> の混焼運転を実施した。その結果、1 時間程度ではあるが安定して高い混焼率で実験が可能であることが分かった。また、液化 NH<sub>3</sub> の気化によって給気の温度が下がり、排気中の N<sub>2</sub>O が増加することが明らかになったため、給気の過度な温度低下を防ぐために給気を温水により保温する装置を追加した。給気の保温により排気中の N<sub>2</sub>O の増加を抑制することができた。

最終年度は、前年度に製作・試運転した NH<sub>3</sub> を液状で供給する装置を使用して、ディーゼル機関の吸気に液化 NH<sub>3</sub> を供給することで、軽油をパイロット燃料とする軽油-NH<sub>3</sub> の混焼運転を行った。エンジンをを用いた実験では、80% 程度までの NH<sub>3</sub> 混焼率において試験を実施し、これまでよりも高い混焼率での NH<sub>3</sub> の影響を実験により確認した。また、パイロット燃料の噴射タイミングを早期化することで、RCCI (反応性制御圧縮着火) 燃焼を用いた運転を、NH<sub>3</sub> 混焼率 43、54、69、80% において実施した。その結果、69% 以上の NH<sub>3</sub> 混焼率では、正常なエンジンの運転ができず、これまでに得られていた RCCI 燃焼による未燃 NH<sub>3</sub> や亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) の低減が達成されることが明らかになった。

数値流体計算ソフト (OpenFOAM) を用いた解析では、昨年度に引き続き、簡易的なエンジン内の燃焼室のモデルを作成し軽油-NH<sub>3</sub> の混焼運転時の内部の燃焼反応の解析のための計算を実施した。計算に使用するヘプタン (軽油相当燃料) と NH<sub>3</sub> の化学反応機構の組合せを作成し、報告されている実験データを用いて検証を行った。検証の結果、作成した化学反応機構は、NH<sub>3</sub> がヘプタンの着火に及ぼす影響を、概ね再現できることを確認した。さらに、作成したヘプタンと NH<sub>3</sub> の化学反応機構を数値流体計算ソフトに組み込み軽油-NH<sub>3</sub> の混焼運転を模擬した計算を実施した。その結果、NH<sub>3</sub> の増加に伴う燃焼や排ガス性分の変化、RCCI 燃焼を用いた際の未燃 NH<sub>3</sub> や N<sub>2</sub>O の低減について、数値計算により定性的に再現できた。研究成果をまとめて、International Journal of Engine Research 誌に投稿した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Niki Yoichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Reductions in Unburned Ammonia and Nitrous Oxide Emissions from an Ammonia Assisted Diesel Engine with Early Timing Diesel Pilot Injection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Engineering for Gas Turbines and Power	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4051002	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 Niki Yoichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental and numerical analysis of unburned ammonia and nitrous oxide emission characteristics in ammonia/diesel dual-fuel engine	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Engine Research	6. 最初と最後の頁 -
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 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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 仁木 洋一
2. 発表標題 NH3混焼ディーゼル機関におけるCFDを用いた燃焼計算結果と実験結果の比較
3. 学会等名 第92回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoichi Niki
2. 発表標題 Experimental Investigation of Effects of Split Diesel-Pilot Injection on Emissions From Ammonia-Diesel Dual Fuel Engine
3. 学会等名 ASME 2021 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仁木 洋一
2. 発表標題 数値計算を用いたアンモニアの燃焼解析
3. 学会等名 第91回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仁木洋一、市川泰久、平田宏一
2. 発表標題 吸気へのアンモニア混合がディーゼル機関の燃焼に与える影響
3. 学会等名 第90回（令和2年）マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仁木洋一、市川泰久、新田好古、平田宏一
2. 発表標題 アンモニア混焼ディーゼルエンジンの現状と課題
3. 学会等名 海上技術安全研究所 研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 アンモニア混焼方法、アンモニア混焼エンジン及びそれを搭載した船舶	発明者 仁木洋一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、8351006000	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------