

13 アンモニア混焼ディーゼルエンジンの現状と課題

仁木 洋一*, 市川 泰久*, 新田 好古*, 平田 宏一*

Investigation on Diesel Engine Fueled by Ammonia and Diesel Fuel

by

NIKI Yoichi, ICHIKAWA Yasuhisa, NITTA Yoshifuru, HIRATA Koichi

Abstract

The reduction of greenhouse gas (GHG) emission is necessary to prevent climate change. In 2018, the International Marine Organization set a target to reduce GHG emission by at least 50% in 2050 compared with the emission in 2008. One effective method for reducing GHG emission from international shipping is using low-carbon alternative fuels, including natural gas, hydrogen (H_2) and ammonia (NH_3), at ship power plants. The chemical structure of ammonia consists of three hydrogen atoms and one nitrogen atom. The vapor pressure of NH_3 is about 1 MPa at room temperature. It is relatively easy to store and transport compared with hydrogen. Additionally, the combustion of NH_3 does not emit carbon dioxide, which is similar to hydrogen. Because of these ideal properties, NH_3 has been focused as ship fuel. However, NH_3 is toxic to people, and NH_3 combustion may lead to the emission of unburned NH_3 and nitrous oxide (N_2O), resulting in the greenhouse effect. The aim of this project is to develop combustion strategies for reducing unburned NH_3 and N_2O emissions from a diesel engine fueled by diesel and NH_3 . In this study, a chemical kinetics simulation was used to investigate the ignition and combustion of an n-heptane- NH_3 -air mixture. The experiment was conducted by using the single cylinder diesel engine with NH_3 gas mixed into the engine intake. This paper describes the results of the simulation and the experiment. The results of the simulation showed that radicals such as OH produced by n-heptane decomposition promotes NH_3 combustion, and NH_3 prolongs the timing of n-heptane ignition. Results of the experiment suggest pilot injection could be effective for reducing NH_3 and N_2O emissions.

* 環境・動力系

原稿受付 令和2年4月28日

審査日 令和2年6月8日

1. はじめに

地球温暖化を防ぐために、温室効果ガス (GHG) 削減が強く求められている。海事分野においては、国際海事機関 (IMO) により GHG 削減戦略が取りまとめられ、2008 年をベースに、2030 年までに国際海運全体の燃費効率 (トン・マイル当たりの GHG 排出量) を 40% 改善し、2050 年までに GHG 排出量を半減させ、最終的には今世紀中のなるべく早い時期に GHG 排出ゼロを目指すことになっている¹⁾。

GHG 排出量低減のために、減速航行等の運航方法の改善や船型の改良といった技術が採用されている。一方、動力システムにおいては、風力などの自然エネルギーの利用の他、代替燃料による GHG 削減技術の検討が行われている^{2,3)}。代替燃料による GHG の削減方法としては、低炭素燃料の利用や再生可能エネルギーを利用して生成された水素、水素エネルギーキャリアとして注目されるアンモニア (NH_3) が挙げられる。 NH_3 は、燃焼しても二酸化炭素 (CO_2) を排出しない特徴や、大気圧下において容易に液化させることが可能であり、大量輸送がすでに行われている。このような NH_3 の性質に着目し、燃料として利用する研究・開発が実施されている。著者らは、 CO_2 排出量削減を目的に、船用機関への NH_3 利用に関する研究を行ってきた⁴⁾。これまでに、軽油で運転される単気筒ディーゼル機関の吸気に NH_3 ガスを混合した NH_3 混焼ディーゼル機関を運転し、軽油消費量の削減を確認している。

本報告では、これまでの研究結果及び現状の課題について報告する。

2. アンモニアの燃焼

表 1 に NH_3 と軽油の物性値の比較を示す。同表に示すように、軽油と比較して、 NH_3 の着火温度は高く、燃焼速度は遅いため、現状のディーゼル機関において、 NH_3 単体での圧縮着火燃焼は困難である事が分かる。 NH_3 を着火燃焼させるためには、副室式火花点火やパイロット燃料による着火などのエネルギーの高い着火方式が必要であると考えられる。本研究では、 NH_3 を船舶で多く用いられているディーゼル機関において利用するために、吸気に混合した NH_3 と軽油を混焼により利用する方法を試みた。本方法は、機関への大きな改造が不要で、既存船舶へも比較的簡便に適用可能な方法であると考えられる。

吸気に混合された NH_3 が、軽油の燃焼に及ぼす影響を調べるために、Cantera⁵⁾ と呼ばれる気体の化学反応が計算可能なソフトウェアを利用して、ヘプタン (C_7H_{16}) - NH_3 -空気混合気の着火・燃焼の断熱定圧過程における計算を行った。化学反応機構には、CRECK Modeling Group⁶⁾ らの機構を用いた。ここで、 C_7H_{16} は軽油相当燃料として使用し、理論混合比の C_7H_{16} -空気混合気中に NH_3 を混合した。計算結果を図 1 に示す。初期圧力と温度は、ディーゼル機関燃焼室内の状態を模擬して 5 MPa、1000 K とした。時間経過と共に C_7H_{16} の分解が進み、着火過程の中間生成物である H_2CO が生成され、ある時点で H_2CO の急激な減少と温度の急激な上昇を伴う混合気の着火が確認できる。 NH_3 の混合量の増加に伴って、この着火時間が遅

延している。一方、 NH_3 は、僅かに減少し続けた後、着火時に急激に減少している。 NH_3 の分解過程は、OH、H や O などの活性種と反応することで進行する⁷⁾。これらの活性種は C_7H_{16} の分解過程で生成されており、 NH_3 の分解により消費されるため、着火後の OH の残存量は、 NH_3 濃度の増加と共に減少している。また、 NH_3 の分解反応と共に N_2O が生成されているが、 NH_3 の分解反応の終了後、熱分解と OH などの活性種との反応により減少している。 NH_3 の分解反応を早く終了させることで、 N_2O の排出量を低減できる可能性がある。 NH_3 を混焼する場合は、着火遅れ時間の延長や N_2O の生成に注意が必要である。

3. 実験装置

実機による NH_3 混焼試験は、自然吸気の単気筒ディーゼル機関を供試機関として実施された。供試機関の諸元を表 2 に示す。液化 NH_3 タンクから、ガス状の NH_3 が吸気ポートに設置されているガスインジェクタに供給された。 NH_3 ガスは、ガスインジェクタにより吸気行程の間に、吸気ポート内に噴射された。実験装置概要図を図 2 に示す。実験中は、供試機関に接続された電気式負荷装置により、設定した回転速度に保たれるように、トルクが自動で制御された。排ガス成分は、FTIR

表 1 物性値比較

		Ammonia	Diesel
Formula		NH_3	CnHm
Phase		Liquid	Liquid
Density at 298K	[kg/m ³]	603	830
Vapor pressure at 298K	[MPa]	1	-
LHV	[MJ/kg]	18.6	46
Volumetric energy density	[GJ/m ³]	11.2	38.2
Laminar flame speed	[cm/s]	7	74
Ignition temp.	[K]	925	503

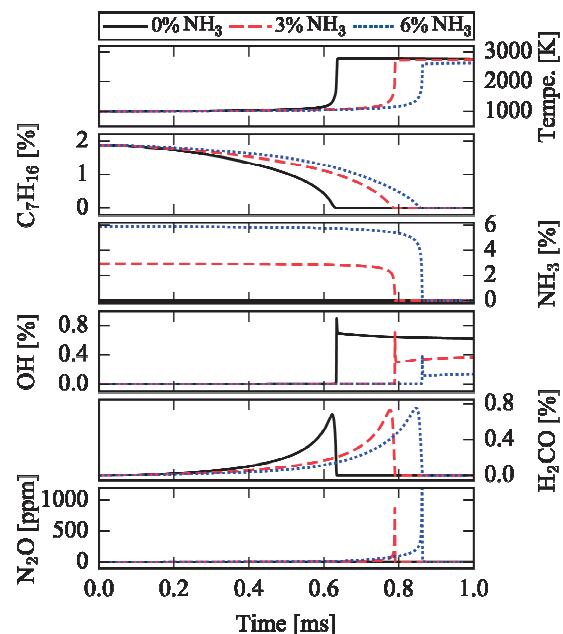


図 1 化学反応機構による数値計算結果
ヘプタン-空気- NH_3 混合気の着火燃焼過程

式排ガス分析器（岩田電業社製）により同定された。

4. 実験結果及び考察

本章では、まず、 NH_3 混合による筒内圧力・排ガス成分の変化について報告する。次に、 NH_3 の混焼により排ガス中に未燃の NH_3 、温室効果を持つ N_2O の発生が確認できたため、軽油 2 段噴射を用いてこれらの低減を試みた。その結果を述べる。

4.1 NH_3 混焼の影響

軽油により運転される供試機関の吸気に、 NH_3 ガスをガスインジェクタにより供給した。 NH_3 ガスの供給後に、供試機関の出力を一定に保つために、軽油の噴射量を調整した。

図 3 に NH_3 混合による軽油と NH_3 合計の発熱量に対する熱効率と代表的な排ガス成分を示す。 NH_3 供給量の増加と共に、熱効率はやや低下しているが、 NH_3 の供給により CO_2 は減少している。一方、未燃の NH_3 と温室効果ガスである N_2O の排出量は増加している。ここで、 NH_3 供給量が最大である 35 l/m 程度の場合に着目する。この場合の NH_3 の熱量は、軽油消費量と NH_3 供給量の合計発熱量の 30% 程度である。 CO_2 濃度は、約 7% から 5% に約 30% 減少しており、供給した NH_3 の発熱量割合と一致している。

図 4 に NH_3 供給量が 0, 18, 35 l/m の場合の筒内圧力、熱発生率及び噴射管内圧力を示す。 NH_3 の混合により着火遅れ時間の延長が確認できる。これは、化学反応機構を用いた計算においても見られた NH_3 の分解反応により、着火時間が延長された結果であると考えられる。

4.2 軽油 2 段噴射による NH_3 及び N_2O の低減効果

化学反応機構を用いた数値計算の解析により、 NH_3 は軽油相当燃料である C_7H_{16} の分解・着火過程で発生する OH などの活性種によって分解されていること、 N_2O は NH_3 の分解反応を早く終了させることで、低減されうることが示唆された。 NH_3 の燃焼反応を促進し、未燃 NH_3 や N_2O の低減効果を得るために、主噴射の前に、軽油を燃焼室内に広く分布させる早期噴射を追加する軽油の 2 段噴射が有効であると考えられた。供試機関の燃料噴射弁をコモンレール及び電子制御式燃料噴射に変更し、軽油 2 段噴射（早期及び主噴射）による未燃 NH_3 と N_2O の低減を試みた。

図 5 は、軽油早期噴射時期の変更が熱効率及び排気成分に及ぼす影響を示している。なお、主噴射のみの結果を図中の右端に示している。また、 NH_3 供給量は、熱量割合で約 20% となるように調整し、機関のトルクは、60 Nm 一定として、回転速度 1000, 1500 min^{-1} の 2 種類において実験を実施した。早期噴射による軽油噴射量は、軽油噴射量合計の約 36% に設定し、機関の出力を一定に保つために主噴射の開弁時間を変更した。早期噴射時期を進角していくと、未燃 NH_3 が低減され、未燃率は 2% 程度まで改善している。ただし、早期噴射-30 deg. ATDC（上死点前）の場合は、未燃 NH_3 及び N_2O の低減効果は見られない。また、早期噴射時には、 NO_x 及び THC が増加している。

図 6 に回転速度 1500 min^{-1} における早期噴射による筒内圧

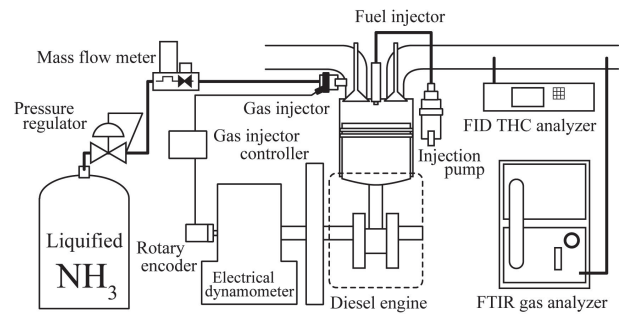


図 2 実験装置概要図

表 2 供試機関主要緒元

Base engine	AVL type 520
Type	4-stroke
Bore/stroke	112/110 mm
Num. Cyl.	1
Displacement	1.08 L
Comp. Ratio	18.5
Aspiration	NA
Rated power	7.7kW 1500rpm

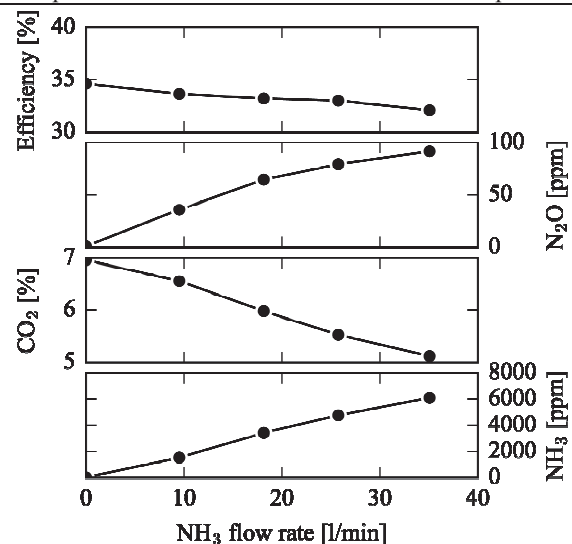


図 3 NH_3 流量と発熱量割合及び主要排ガス成分
(回転速度 1500 min^{-1} , トルク 51 Nm)

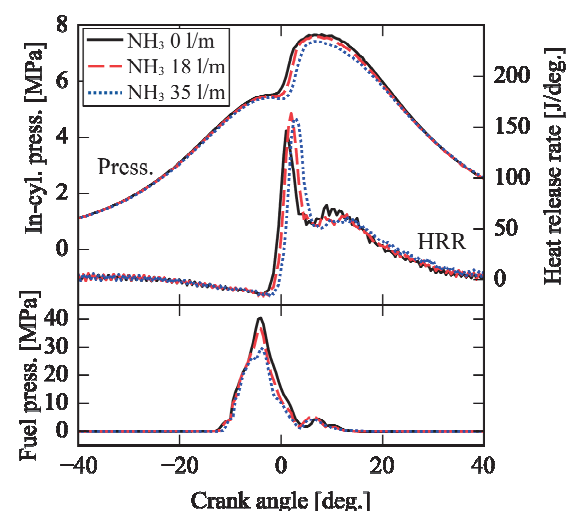


図 4 NH_3 混合による筒内圧力の変化
(回転速度 1500 min^{-1} , トルク 51Nm, NH_3 流量 0, 18, 35 l/m)

力の変化を示す。早期噴射時期によらず、筒内最高圧力は上昇している。また、大きな熱発生が最初に見られるクランク角は、 -15 deg. ATDC あたりであり、同程度である。早期噴射 -30 deg. ATDC の場合は、筒内最高圧力が高いにも関わらず、図 5 からわかるように未燃 NH_3 及び N_2O の低減効果が得られていない。一方、早期噴射 -50 deg. ATDC の場合、早期噴射した軽油は、燃焼室内に比較的広く分布し、軽油- NH_3 -空気混合気が作られたと考えられる。未燃 NH_3 及び N_2O の低減に対して、軽油が燃焼室内に広く分布し、軽油の分解過程において生成された OH などの活性種により、 NH_3 の分解が促進される効果が大きいことを示唆している。さらに、図 6 の熱発生速度及び累積熱発生に着目すると、主噴射の前に早期噴射された軽油によって着火・燃焼が起こっている。主噴射直前の累積熱発生は全熱発生の約 50% に達している。これは早期噴射された軽油と NH_3 分に相当し、 NH_3 は、その多くが主噴射の前に燃焼していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、化学反応機構を用いた軽油と NH_3 の燃焼解析、単気筒ディーゼル機関の吸気に NH_3 を混合し軽油と NH_3 を燃焼した結果、下記の知見を得た。

- ・数値計算の結果から、 NH_3 は、軽油の分解過程で生成される OH などの活性種によって分解されていると考えられる。
- ・供給した NH_3 の発生熱量相当分の軽油消費量が削減され、 CO_2 の排出量の低減を確認した。
- ・ NH_3 の混焼により、未燃 NH_3 、温室効果ガスである N_2O の排出の恐れがあり、排出量増加に注意が必要である。
- ・軽油早期噴射により軽油を NH_3 -空気混合気に着火・燃焼前に混合することで、未燃 NH_3 、 N_2O の低減効果を確認した。
- ・筒内圧力解析結果から、吸気に混合した NH_3 は早期噴射された軽油と共に燃焼していると考えられる。

今後、本研究の知見を生かして、 NH_3 の混合量を増加させると共に、早期噴射を用いて未燃 NH_3 と N_2O の発生を抑制する燃焼方式の研究開発を行う。

謝辞

本研究は、海上技術安全研究所重点研究費の他、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「エネルギーキャリア」(管理法人:JST)の助成を受けて実施された。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) <https://www.mlit.go.jp/common/001231681.pdf> (2020/4)
- 2) DNV・GL:ENERGY TRANSITION OUTLOOK 2019 EXECUTIVE SUMMARY, (2019).
- 3) Lloyd's Register:Zero-Emission Vessels 2030, (2017).
- 4) 春海:SIP 船用ディーゼルエンジンへのアンモニア燃料利用に関する実験的検討終了報告書, (2019).
- 5) D. G. Goodwin: Cantera, v2.2.1 (2016).
- 6) <http://creckmodeling.chem.polimi.it> (2020/4)
- 7) E. Okafor: Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH_4 - NH_3 -air premixed

flames, Combust. Flame 187, 185-198, (2015).

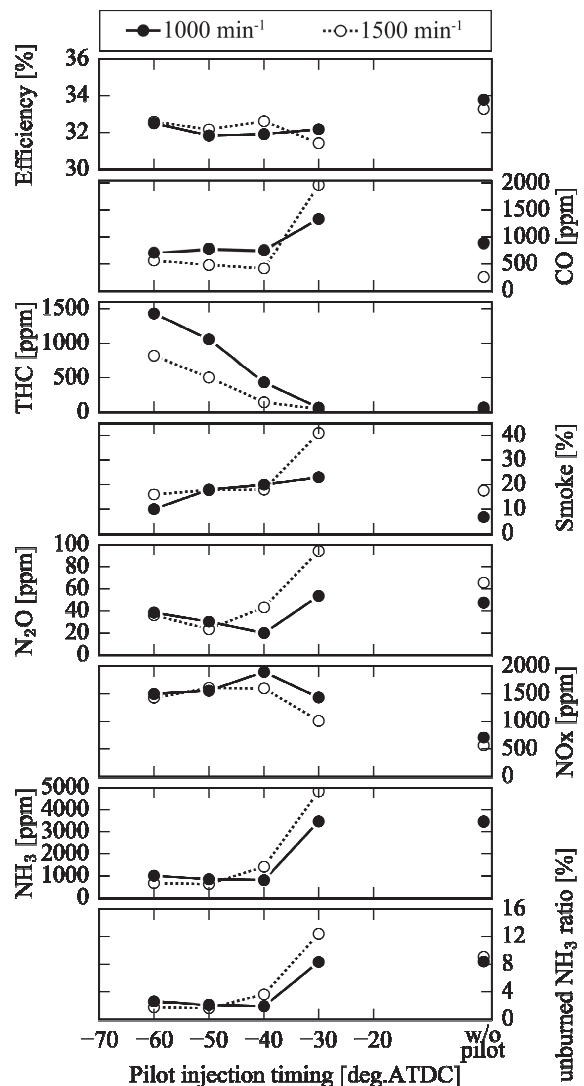


図5 軽油2段噴射の未燃 NH_3 、 N_2O の低減効果 (NH_3 発熱量 20%, トルク 60 Nm)

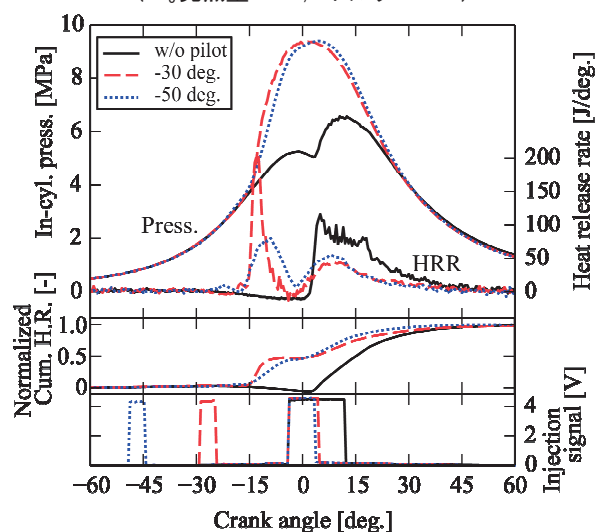


図6 2段噴射時の筒内圧力と熱発生速度 (NH_3 発熱量 20%, 回転速度 1500 min^{-1} , トルク 60 Nm)
(-30 deg. ATDC: 早期噴射量 0.015 mg, 主噴射量 0.028 mg)
(-50 deg. ATDC: 早期噴射量 0.015 mg, 主噴射量 0.026 mg)