

PS-10 アンモニア混焼ディーゼル機関に関する研究開発の現状

環境・動力系 * 仁木 洋一、市川 泰久、新田 好古、平田 宏一

1. はじめに

地球温暖化を防ぐために、船舶においても温室効果ガス (GHG) 削減が強く求められている¹⁾。船舶の動力システムにおいては、代替燃料による GHG 削減技術の検討が行われており、その一つとしてアンモニア (NH₃) が挙げられる。NH₃ は、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。また、その燃焼は、二酸化炭素 (CO₂) を排出しない。この様な NH₃ 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。しかし、NH₃ は、軽油と比較して反応性が悪いため、現状のディーゼル機関において、NH₃ 単体での圧縮着火燃焼は困難である。NH₃ を着火燃焼させるためには、パイロット燃料による着火など、エネルギーの高い着火方式が必要であると考えられる。また、NH₃ は、燃焼生成物として GHG である亜酸化窒素 (N₂O) を生成することが知られている。著者らは、CO₂ 排出量削減を目的に、船用機関への NH₃ 利用に関する研究を行ってきた^{2,3)}。

本報告では、小型単気筒ディーゼル機関および船用中速ディーゼル機関を用いて NH₃ 混焼試験を実施した結果を報告する。

2. 小型単気筒ディーゼル機関による NH₃ 混焼実験

小型単気筒ディーゼル機関 (4 ストローク, 7.7 kW, 1500 min⁻¹) を用いた実験では、排出される N₂O を燃焼の改善によって削減する方法を検討した。本実験では、軽油を用いたディーゼル機関の吸気に、NH₃ ガスを混合する方法について検討した。本方法を用いることにより、機関の大きな改造が必要なく、既存のエンジン技術を活用できる。

図 1 に実験に用いた小型単気筒ディーゼル機関を含む実験装置の概要を示す。機関の諸元、NH₃ の供給方法及び軽油噴射システムの詳細については、既報をご参照頂きたい^{2,3)}。

図 2 に小型単気筒ディーゼル機関を用いた NH₃ 混焼の結果を示す。図には、下記の 3 つの条件における NH₃ 混焼率に対する NH₃ 及び N₂O, GHG 排出率が示されている。

- (1) 通常の軽油噴射時期 (SoI) において、出力を一定として、NH₃ 供給量を増加させた結果
- (2) 軽油噴射時期を通常より進角させた状態において、軽油噴射量を一定として、NH₃ 供給量を増加させた結果
- (3) 上記 (2) の運転条件を調整し、NH₃ 供給量をさらに増加させた結果

ここで、NH₃ 混焼率とは、軽油と NH₃ の合計の供給熱量に対する NH₃ の発熱量の割合を示している。また、GHG 排出率は、式 (1) を用いて算出した値である。式 (1) は、CO₂ 排出率を算出する式中の CO₂ 濃度に、N₂O の温室効果を考慮して CO₂ 相当濃度にしたものを加算したものである。

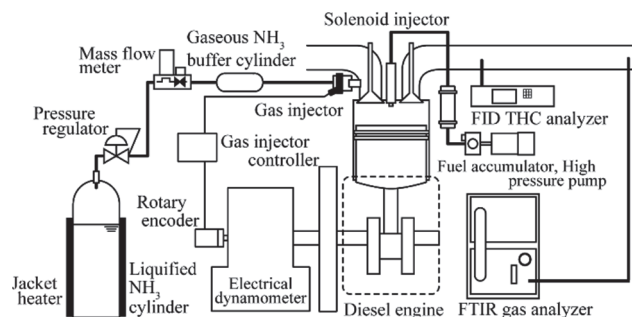


図-1 小型単気筒ディーゼル機関を用いた実験装置概要図

- (1) Const. power: 8 kW at Sol: 10 deg. bTDC
- ▲ (2) Const. diesel: 21 mg at Sol: 45 deg. bTDC
- (3) Power: 7.7 kW, diesel: 20 mg at Sol: 35 deg. bTDC

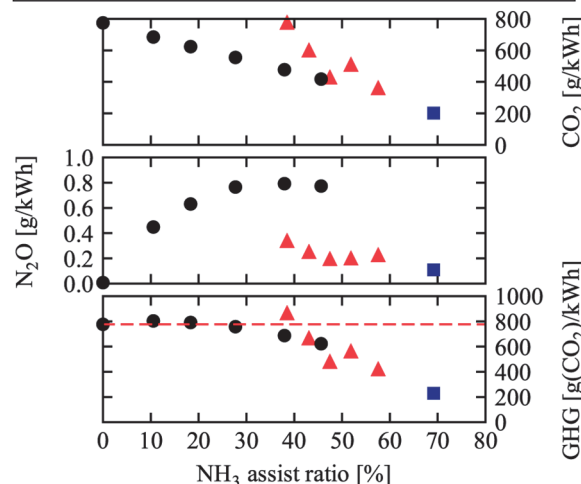


図-2 小型単気筒ディーゼル機関を用いた NH₃ 混焼の結果

Brake specific GHG emissions

$$= \frac{\left(\frac{C_{CO_2}}{100} + \frac{C_{N_2O} \times GWP_{N_2O}}{1000000} \right) Q_{exh}}{MV_{CO_2}} MW_{CO_2} \frac{1}{P} \quad (1)$$

ここで、 C_{CO_2} 及び C_{N_2O} は、それぞれ CO₂ 濃度 [%], N₂O 濃度 [ppm]. GWP_{N_2O} は、N₂O の温室効果係数 (本研究では 265 とした)⁴⁾. Q_{exh} は排ガス流量 [m³/h]. MV_{CO_2} 及び MW_{CO_2} は、それぞれ CO₂ のモル体積 [m³/mol], モル質量 [g/mol]. P は、機関の軸出力 [kW] である。

条件 (1) は、軽油を用いて運転されるディーゼル機関の給気に NH₃ を混合した運転である。NH₃ の供給量の増加と共に軽油の噴射量を低減させることで出力を一定に保った。条件 (1) の結果が示すように、NH₃ 混焼率の増加が 30% 程度までは、NH₃ 混焼率と共に N₂O 排出率が増加しているため、軽油消費量の削減によって、CO₂ が減少しているにもかかわらず、GHG 排出率は、図中破線として示される NH₃ 混焼をしない場合と比較して、低減されていない。NH₃ 混焼率が 30% よりも

大きい条件では、 N_2O 排出率がほぼ一定となるため、GHG 削減効果が得られている。

条件(2)は NH_3 の反応を促進するために、軽油噴射時期を進角し、燃焼室内に軽油を広く分布する試験を行った。軽油噴射量を一定にして、軽油の噴射時期を上死点前(bTDC)45°に進角した。条件(1)の噴射時期 10°bTDC の結果と比較して N_2O 排出率が低減されていることが分かる。 N_2O 排出率の低減により、 NH_3 混焼率が 58% の場合には、図中左端に示される条件(1)の NH_3 混焼をしない場合と比較して、約 46% の GHG の削減効果が得られている。なお、 NH_3 混焼率が低い場合は、 NH_3 の供給量が少ないことや、着火時期の進角などによって、軸出力が 3.7kW と低くなるため、GHG 排出率が増加している。

条件(3)は、条件(2)から、さらに GHG 削減を達成するために、 NH_3 供給量の増加及び軽油噴射時期の調整を行った条件である。この場合、 NH_3 混焼率 69% の場合に、条件(1)の NH_3 混焼をしない場合と比較して、GHG を 68% 低減している。条件(3)においても、機関の運転状態は安定していた。

本実験において、軽油の噴射時期の進角により N_2O 排出率の低減効果が得られた。本報告には示していないが、 N_2O 排出率の低減と同時に、未燃のまま排出される NH_3 の低減効果も確認した。ただし、窒素酸化物、一酸化炭素、未燃炭化水素の増加も確認されたため、燃焼方式のさらなる改善が必要である。

3. 船用中速ディーゼル機関による NH_3 混焼実験

本実験に用いた船用中速ディーゼル機関の諸元を、表 1 に示す。本実験では、A 重油によって運転される機関の給気には NH_3 ガスを混合することで NH_3 混焼を行った。機関は、750 kW、1000 min^{-1} を 100% とした船用負荷特性において、25、50、

表-1 船用中速ディーゼル機関主要目

Engine type	4-stroke, turbocharged with intercooler
Cylinder arrangement	Inline 6
Bore / Stroke	190 / 260 mm
Rated power	750 kw at 1000 min^{-1}

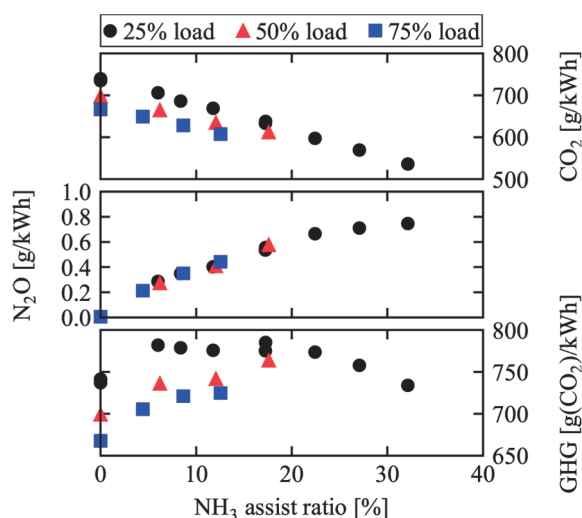


図-3 中速船用ディーゼル機関を用いた NH_3 混焼の結果

75%の負荷率で運転した。A 重油の噴射量は、调速機によって自動で調整されるため、 NH_3 の供給量の増加と共に、減少することとなる。 NH_3 は、液化 NH_3 ボンベから気化したガスを、機関の空気冷却器出口に混合し、すべての気筒に NH_3 を供給した。また、 NH_3 ガスの供給量の上限が約 900 L/min であったため、 NH_3 混焼率の最大値は、負荷率の増加と共に小さくなっている。

各負荷率における NH_3 混焼率に対する GHG 排出率を図 3 に示す。すべての負荷率において、 NH_3 混焼率の増加と共に、 CO_2 排出率が減少している。ただし、 NH_3 混焼率が 20%より低い場合、いずれの負荷率においても、GHG 排出率は NH_3 混焼率の上昇に伴い増加している。これは、 N_2O 排出率が増加していたためである。25%負荷率においては、 NH_3 混焼率が 20%より大きくなると、 N_2O 排出量の増加が抑えられたため、 NH_3 混焼率と共に増加していた GHG 排出率は減少している。 NH_3 混焼率 32% の場合、 NH_3 混焼しない場合（図中左端）と比較して、GHG 排出率がわずかに低減している。

また、本実験時には、少量であるがブローバイガスに NH_3 が混合することが確認された。ディーゼル機関を用いた NH_3 燃料利用において、対策が必要な項目であると考えられる。

4. まとめ

報告した研究成果から、 NH_3 を混焼した場合、 N_2O が生成され、 N_2O による温室効果は、 CO_2 削減分を相殺することがある。ディーゼル機関への NH_3 混焼による GHG 削減には、 N_2O の低減が重要である。しかしながら、 N_2O の低減に対して、小型単気筒ディーゼル機関の実験において、軽油噴射時期の進角が有効である事が確認された。中速船用ディーゼル機関を用いた実験において、 NH_3 混焼率に対する GHG 排出率の変化は、小型単気筒ディーゼル機関の実験における条件(1)の結果と同じ傾向を示しており、 N_2O の低減においても、小型単気筒ディーゼル機関に用いた同様の方法が有効であることが予測される。

本報告では、 NH_3 混焼時の GHG の排出について主に報告したが、本研究により、 NH_3 の燃料利用における NH_3 供給方法や安全対策、 NH_3 燃焼に関する知見が得られている。本知見を活かして、今後も NH_3 燃料利用に関する研究開発を実施する。

謝辞

本研究の一部は、2020 年度国土交通省からの請負研究「アンモニア燃焼による排気ガス中の温室効果ガスに関する調査」の一環として実施されたものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) <https://www.mlit.go.jp/common/001231681.pdf> (2020/4)
- 2) Y. Niki et al.: J Eng Gas Turbin Power, (2019), 061020.
- 3) 仁木ら: 第 90 回 JIME 学術講演会, (2020), pp. 105-110.
- 4) Core Writing Team: Climate Change 2014 Synthesis Report, (2014).