

PS-15 アンモニアを用いたディーゼル機関の混焼運転

環境・動力系 * 仁木 洋一、西尾 澄人、新田 好古、市川 泰久、関口 秀紀、平田 宏一

1. はじめに

低炭素社会を実現する理想的な燃料である水素(H₂)を使用する熱機関や燃料電池、あるいは水素輸送・貯蔵媒体等の研究開発が進められている。その中で、水素の輸送、貯蔵媒体としてアンモニア(NH₃)が注目されている。液化 NH₃ は、H₂密度が液化 H₂の約 1.5 倍であり、25°C、10 気圧で液化する性質がある。また、液化 H₂と比較した場合、H₂から NH₃への変換にエネルギー損失が生じるが、輸送に要するエネルギーが小さく移動距離が大きいほどメリットがあると試算されている^{1,2)}。このように、液化 NH₃は、H₂の輸送、貯蔵媒体として適していると考えられる。一方、NH₃は、炭素を含まないため、直接燃焼させても水素と同様に、二酸化炭素(CO₂)を発生しない特徴がある。

そこで、本研究では、上述のような性質・特徴をもつ NH₃を船用ディーゼル機関の燃料として、安全かつ高効率に使用する技術を開発し、温室効果ガスの1つである CO₂や大気汚染物質である硫黄酸化物(SO_x)やススの排出量削減に貢献することを目的としている。本報では、軽油を用いて運転される従来のディーゼル機関の吸気に NH₃を供給し、軽油と NH₃の混焼運転を行った実験結果を報告する。

2. 実験装置及び方法

本研究には、単気筒ディーゼル機関(7.7 kW / 1500 rpm)を使用した。本機関には、西尾らが開発したハイブリッド・インジェクション・システム(HIS)³⁾が設置されており、機械式燃料噴射に加えて、電子制御式燃料噴射により任意のクランク角度において燃料噴射が可能である。また、NH₃は、50 kgの液化 NH₃タンクから吸気管に設置したガスインジェクタ(Quantum 110764)に供給し、バルブオーバーラップを除く吸気弁が開いている間に吸気管内へ噴射される。なお、NH₃噴射量は、ガスインジェクタの開弁時間を変更することで調整した。また、排ガス成分は、FTIR 排ガス分析装置(FAST-2200 岩田電業)を用いて計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 NH₃噴射量が及ぼす影響

吸気への NH₃噴射がディーゼル機関の混焼燃焼に及ぼす影響を調べるために、出力 6kW、回転速度 1362 rpm の条件において、NH₃噴射量を変更し、筒内圧力及び排ガス成分を測定した。図 1 に NH₃の噴射量に対する熱効率、軽油消費量及び排ガス成分の測定結果を示す。図に示される熱効率は、軽油及び NH₃の低位発熱量の合計と軸出力から算出した。熱効率は、NH₃噴射量の増加と共に、僅かに低下している。また、NH₃噴射量の増加に合わせて、軽油の噴射量を、出力を一定に保つために減らしている。これは、NH₃の燃焼

により発熱があるためである。このように、熱効率は僅かに低下するが、NH₃噴射量を増やすことで軽油消費量をさらに削減することが可能であると考えられる。

また、NH₃噴射量の増加と共に、排ガス中の NH₃、亜酸化窒素(N₂O)、一酸化炭素(CO)、水(H₂O)は増加し、CO₂は

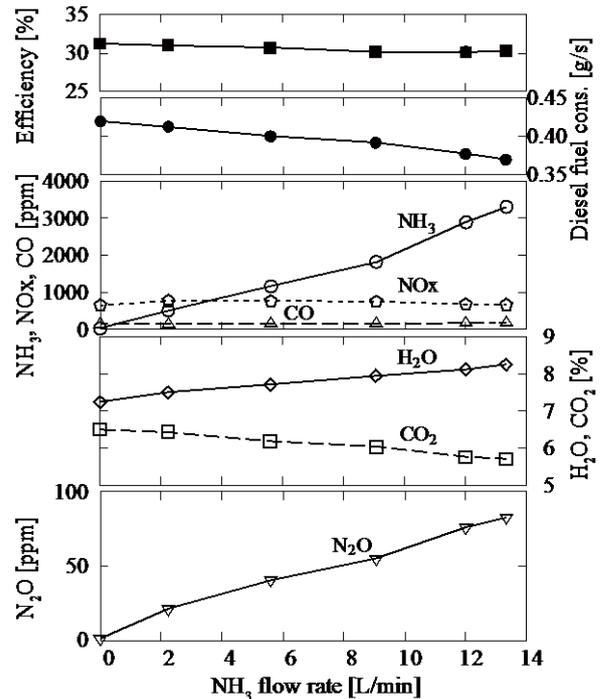


図1 NH₃噴射量に対する熱効率と排ガス成分

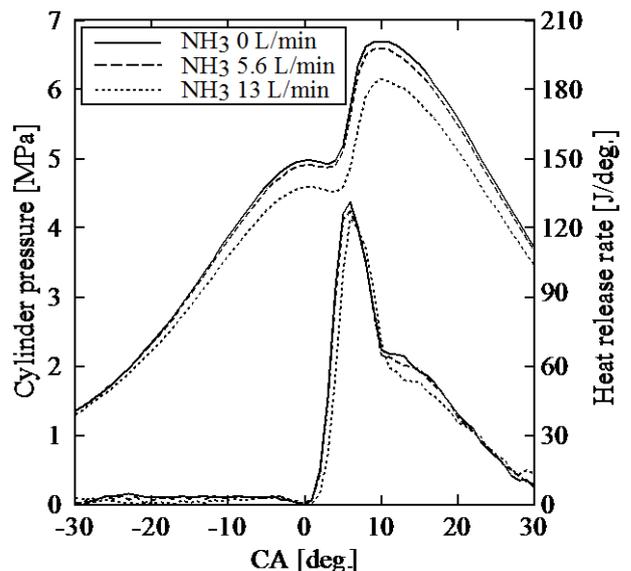


図2 NH₃噴射時の筒内圧力と熱発生速度 (6 kW, 1362 rpm)

低下した。一方、NO_x（一酸化窒素(NO)、二酸化窒素(NO₂))の変化は、ほとんど見られなかった。また、排ガス中のNO₂はNOの1%程度であった。排ガス中のNH₃は、未燃のNH₃であり、排ガス流量と濃度から算出したその流量は、NH₃噴射量にかかわらず、NH₃噴射量の12.7~15.5%と同程度であった。未燃NH₃の原因は、NH₃と空気の混合気が、自着火せずに燃焼室内の高温部分において燃焼しているからであると考えられる。また、NH₃噴射量の増加と共にN₂Oの発生量が増加している。このN₂OはNH₃の燃焼反応中に生成されたと考えられる。図2に、NH₃噴射量を0, 5.6, 13 L/minとした場合の筒内圧力及び熱発生速度を示す。なお、筒内圧力は50サイクルの平均である。同図から、NH₃噴射量を増加すると、圧縮端圧力及び最大圧力が低下する傾向が見られる。これは、NH₃を混合したことによる吸気の組成や温度、燃焼室壁面への熱損失の変化が原因であると考えられる。また、NH₃噴射量が13 L/minの場合に、着火時期に僅かな遅れが見られる。これは、圧縮端圧力及び圧縮端温度の低下が原因であると考えられる。

3. 2 ポスト噴射による未燃NH₃の削減効果

図1から、NH₃を吸気に混合すると、排ガス中のNH₃とN₂Oの増加が確認された。NH₃は人体に有害であり、N₂OはCO₂の300倍(100年間換算)の温室効果を持つ物質である。このため、NH₃を燃料として使用するためには、これらの浄化が必要である。NH₃の削減には、SCR脱硝装置を利用し排ガス中のNO_xと反応させることが可能である。しかし、図1に示されるように、排ガス中のNH₃濃度は、NO濃度を超えて増加しており、SCRでは、NO_xとNH₃が等量で反応するため、NO_xと等量以上のNH₃は削減することができない。また、N₂Oについても排ガス後処理による削減方法は、今のところ見当たらない。そこで、NH₃及びN₂Oを燃焼過程で削減する方法として、HISを用いて、軽油のポスト噴射により未燃NH₃の削減を試みた。N₂Oについては、NH₃の燃焼反応により増加すると考えられたが、生成過程が明らかではないため、本報告では、ポスト噴射による変化を調査した。図3に、HISのインジェクタ通電時間に対する熱効率、軽油消費量及び排ガス成分の変化を示す。なお、インジェクタ通電開始は、圧縮上死点後クランク角度40°、NH₃噴射量は、9 L/minである。同図から、通電時間の増加に伴い、軽油消費量は増加し、熱効率は低下しているのが分かる。また、通電時間が600 μs以下では、通電時間が短くポスト噴射がされていないため、熱効率、軽油消費量及び排ガス中の成分の変化はなかった。HISの開弁時間の増加に伴い、NH₃は減少した。しかし、NO_xとNH₃以外の排ガス成分は、開弁時間900 μsまで開弁時間と共に増加したが、CO及びN₂Oは、開弁時間1000 μsでは減少した。これは、開弁時間1000 μsにおいて、機関出口の排ガス温度が700°以上になっており、NH₃の燃焼だけでなく、COの酸化も起こっていると考えられる。また、N₂Oについては、NH₃の燃焼により生成されていると考えられるが、開弁時間1000 μsにおいて、N₂Oは、NH₃が減少しているにもかかわらず減少している。この

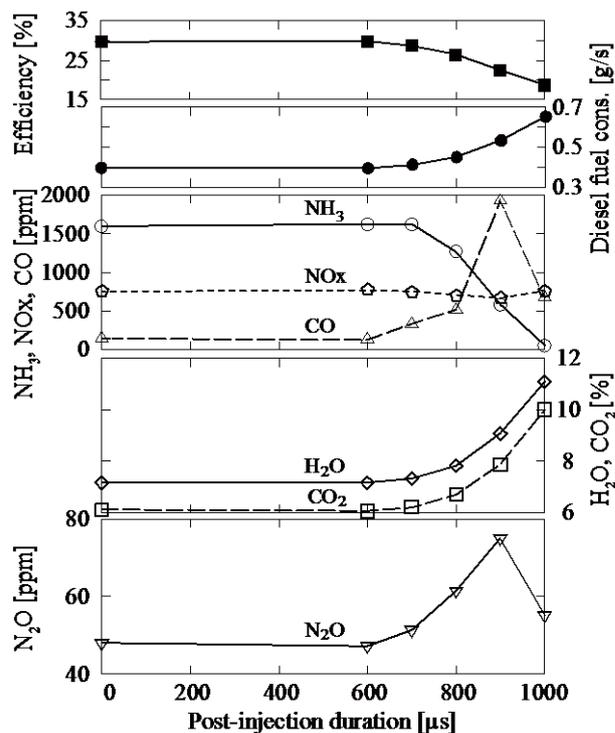


図3 ポスト噴射に対する熱効率と排ガス成分
ことから、NH₃の燃焼反応中のN₂Oの生成・分解速度は、雰囲気温度や圧力により大きく変化することが推察される。

7. まとめ

本研究では、軽油を用いて運転されるディーゼル機関の吸気にNH₃ガスを混合した結果、下記の知見を得た。

- NH₃噴射量と共に、排ガス中のNH₃、N₂O、CO、H₂Oは増加し、CO₂は低下する。
- NH₃は、自着火せずに燃焼室内の高温部分において燃焼していると考えられる。
- ポスト噴射を用いて、未燃NH₃の除去が可能である。
- ポスト噴射の噴射量増加と共にCO、N₂O、燃焼消費率は増加する。しかし、排ガス温度がある程度上昇するとCO、N₂Oは減少する傾向がある。

また、本報告の結果から、NH₃をディーゼル機関で燃料として使用するためには、未燃NH₃への対策が必要であることが示唆された。今後、本知見を基に、ポスト噴射やSCRを用いて未燃NH₃を効果的に削減する方法を、実験及び燃焼解析シミュレーションを用いて開発する予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 15K18298 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 小島、市川、水素エネルギーシステム Vol. 36, No. 4, 34-41, 2011
- 2) 小池ら、日本燃焼学会誌、第58巻184号、35-42, 2016.
- 3) 西尾ら、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol. 47, No. 1, 65-70, 2012.