

PS-18 アンモニア混焼エンジン

環境・動力系 * 仁木 洋一、新田 好古、春海 一佳、平田 宏一、西尾 澄人、関口 秀紀、市川 泰久

1. はじめに

国際海運からの温室効果ガス削減戦略が、2018年4月に国際海事機関に採択された¹⁾ことから分かるように、船舶からの二酸化炭素(CO₂)排出量削減は、国際的に強く望まれている。CO₂排出量削減方法の一つとして、船用機関による代替燃料の利用が検討されている^{2,3)}。代替燃料の中でもアンモニア(NH₃)は、燃焼してもCO₂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。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^{4,5)}。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NH₃ガスを混合したNH₃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。しかし、同時にNH₃の混合により未燃NH₃や亜酸化窒素(N₂O)の排出を確認している。NH₃は、人間に対して毒性があり腐食性も強く、N₂Oは温室効果ガスである。

本研究では、NH₃混焼ディーゼル機関のNH₃及びN₂O排出量削減を目的に、機関の運転状態を変更し、排気成分の排出量変化を考察した。

2. 実験装置及び方法

本研究には、無過給単気筒ディーゼル機関(定格出力7.7kW / 1500 min⁻¹)を使用した。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)に供給され、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により調整した。筒内圧力は、クランク角度0.5度毎に筒内圧力センサとチャージアンブ(GH14P、FI PIEZO AVL)により測定し、50サイクル分を平均した。また、排ガスは、191°Cに設定された加熱導管を通して吸引したのち、THCは、FID分析装置(600HFID CAI)、THC以外の成分は、FTIR排ガス分析装置(FAST-2200 岩田電業)により測定した。スモークの測定はスモークメータ(GSM-3 司測研)を使用した。

3. 結果及び考察

軽油にて運転される供試機関の吸気にNH₃ガスを混合し回転速度及びトルクを変更して実験を行った。なお、各運転点において、NH₃ガスの供給量はその発熱量が、機関に供給される軽油とNH₃の低位発熱量の合計に対して約20%になるように調整した。

3.1 熱効率と排気成分の変化

図-1に、軽油のみの運転とNH₃を混焼した場合の熱効率及び排気成分の変化を示す。また、同図には、供給したNH₃ガ

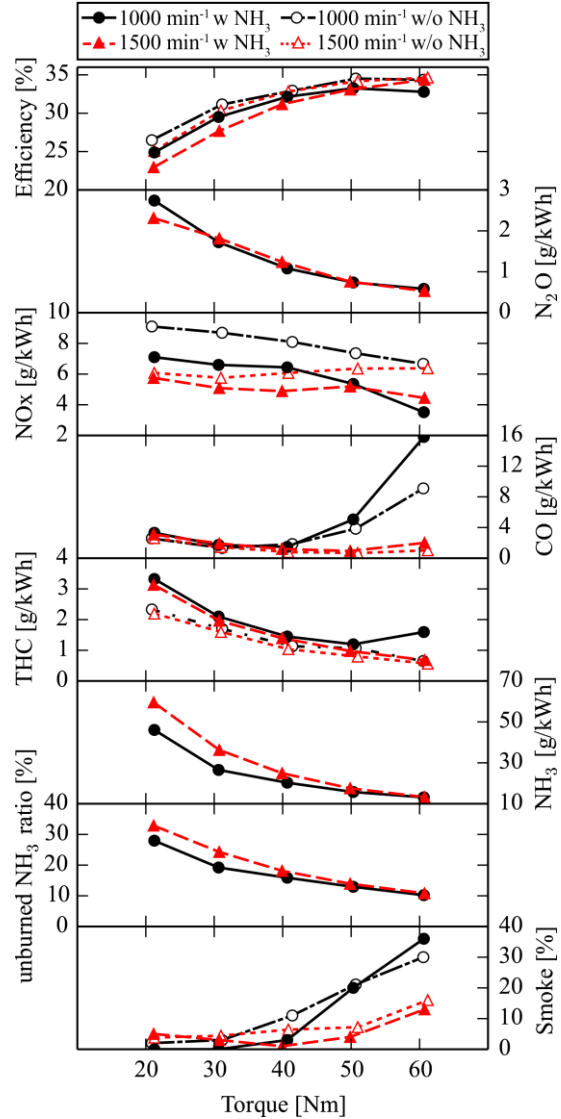


図-1 運転条件による熱効率と排気成分の変化

スに対するNH₃排出量の割合を、NH₃未燃率として示している。図中、N₂OとNH₃の排出は、軽油のみでの運転では確認できなかったため記載していない。熱効率は、NH₃を混合すると、数ポイント低下している。しかし、1500 min⁻¹の場合、トルクの増加と共に熱効率の減少は少なくなる。トルクが60 Nmのとき、軽油のみの運転の場合と同程度である。N₂O及びNH₃排出量は、トルクの増加と共に低下する傾向がある。NH₃未燃率は、60 Nmにおいて約10%であった。60 Nmよりも低いトルクにおいて、回転速度が低い方が未燃率は少なくなっている。NO_x及びTHCは、回転速度やトルクにより変化しているが、NH₃の混合により低減されている。また、スモークも、1000 min⁻¹、60 Nmの場合を除いてNH₃の混合により低減され

ている。対照的に CO は、NH₃ の混合により増加している。

3. 2 シリンダ内の NH₃ 分解過程

図-2 に、NH₃ を混合した場合の筒内圧力と筒内平均ガス温度を示す。同図は、トルクが 20 及び 60 Nm のとき、それぞれの回転速度での結果を示している。同図の熱発生率から、どの条件においても、上死点后クランク角度 -3 から 40 deg. 程度に軽油と NH₃ の燃焼が進行している。その間の筒内圧力は 2~8 MPa 程度、筒内平均ガス温度は、1000~1500 K 程度である。実験において、吸気は、NH₃ を約 3% 含む NH₃ と空気の混合気であり、その空燃比は、理論空燃比の 10 倍程度と希薄である。NH₃ は軽油に比べて着火・燃焼しづらく、混合気も希薄なため、この混合気は、燃焼室に噴射された軽油の燃焼により燃焼室内のガス温度が上昇することで、燃焼していると考えられる。そこで、前節の N₂O 及び NH₃ の排出量の変化を考察するために、NH₃ と空気予混合気の燃焼反応を、化学反応計算ソフトウェア⁶⁾により計算した。本ソフトウェアは、化学反応機構を用いて、反応の進行に伴う組成変化や温度変化を計算することができる。計算では、図-2 に示される雰囲気圧力・温度を参考に初期条件を決定し、圧力一定断熱雰囲気のもと理想気体の反応を仮定した。また、反応機構は、NH₃ と空気の燃焼モデル⁷⁾を使用した。図-3 に、雰囲気圧力 5 MPa、初期温度が 1100, 1300, 1500 K の場合の濃度 3% の NH₃ と空気の予混合気の燃焼反応計算結果を示す。なお、予備的な計算により雰囲気圧力が高いほど、反応の進行は速くなるが、温度が及ぼす影響に比べて小さいことを確認している。図-3 に、雰囲気圧力が 5 MPa における結果を示す。同図に示されるように、NH₃ の分解時には N₂O が生成され、生成された N₂O の分解は、NH₃ の分解や N₂O の生成に比べて遅い。また、NH₃ の分解と生成された N₂O の分解速度は、雰囲気温度が高いほど速くなっている。図-1 に示したように、NH₃ と N₂O の排出量が、回転速度によらずトルクの増加と共に減少したのは、筒内ガス温度の上昇により、NH₃ と N₂O の分解速度が高くなったからであると考える。また、図-1 において、60 Nm 以外の場合、1000 min⁻¹ の場合の NH₃ 排出量が 1500 min⁻¹ の場合よりも少なくなっている。これは、1000 min⁻¹ の場合、同程度のクランク角度間の燃焼であっても、回転速度が低いため燃焼時間が 1500 min⁻¹ の場合よりも長く、NH₃ の分解がより進んだからであると考える。しかし、図-1 に示したように、N₂O については、回転速度による大きな差は確認できず、20 Nm において、1000 min⁻¹ の場合の N₂O 排出量が、1500 min⁻¹ よりも高くなっている。燃焼室内では、軽油噴霧が拡散燃焼しており、高温部分と低温部分が混在しているため、N₂O の生成と分解も混在していると考えられる。本計算結果では、実験結果のような傾向を確認できないが、温度等に対する個々の生成と分解反応の傾向は把握できるものとする。

4. まとめ

本研究では、供試機関を用いた実験と実験条件を基にした NH₃ と空気の燃焼反応の数値計算を行った。実験結果では、

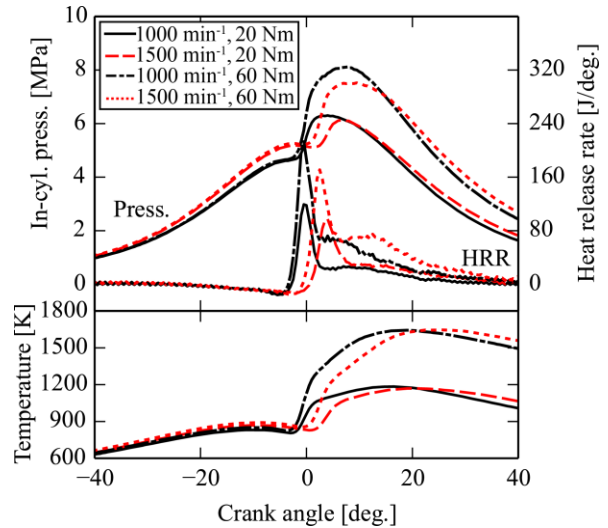


図-2 筒内圧力及び筒内ガス平均温度

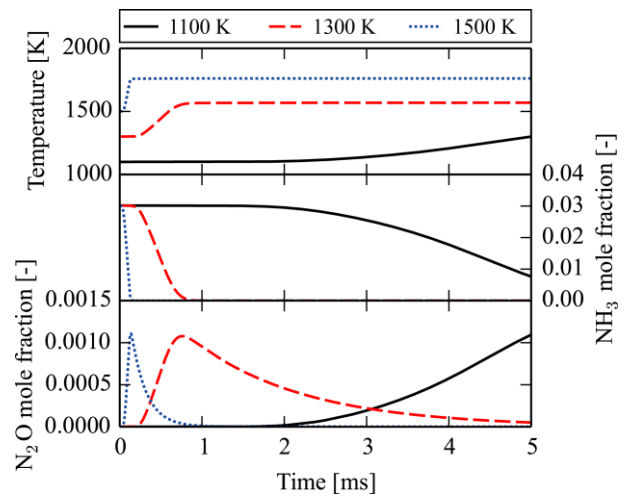


図-3 NH₃-空気予混合気燃焼反応計算結果

トルクの増加により NH₃ と N₂O の排出量の低減が確認された。また、化学反応機構を用いた数値計算により、実験において確認された NH₃ と N₂O の排出量の変化を支持する計算結果が得られた。今後、実験と数値計算による解析を併用することによって、ディーゼル機関における NH₃ 燃料利用の研究開発を推進する予定である。

謝辞

本研究は、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) によって実施されました。

参考文献

- 1) 国土交通省報道発表資料, http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000104.html
- 2) OECD, <https://www.itf-oecd.org/decarbonising-maritime-transport>, 2018.
- 3) Lloyd's Register, <https://www.lr.org/en/insights/global.../zero-emission-vessels-2030/>, 2017.
- 4) 仁木他, 第 86 回マリンエンジニアリング学会学術講演会講演論文集, pp. 147-148, 2016.
- 5) Y. niki, et al., Proceeding of the ASME International Combustion Fall Technical Conference, ICEF2016-9364.
- 6) D. G. Goodwin, H. K. Moffat and R. L. Speth, Cantera: version 2.1.1 (2014), <http://www.cantera.org>
- 7) H. Nakamura, Combustion and Flame 185, pp16-27, 2017.