

平成 30 年 9 月 4 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18298

研究課題名(和文)ディーゼル機関におけるアンモニアの燃焼及び燃焼生成物排出特性の解明

研究課題名(英文) Effects of ammonia gas mixed into intake air on combustion and emissions characteristics in diesel engine

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ディーゼルエンジンの吸気にアンモニア(NH₃)を混合し、その燃焼と排出物質を実験的に確認し、NH₃が混合している空気内で起こる軽油の燃焼過程を考察するために、数値計算プログラムを作成した。実験では、混合したNH₃による軽油消費量の削減、未燃NH₃やN₂Oの排出を確認した。また軽油のパイロット噴射により、未燃NH₃やN₂Oの排出量を低減させられることを確認した。また、Canteraとよばれる化学反応計算ソフトを燃焼計算に適用したマルチゾーンモデルによるプログラムを作成した。計算による熱発生率は、噴霧の空気導入量に関する定数を調整することで、実験結果と概ね一致することを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the experiments and simulation were conducted to investigate ammonia (NH₃) combustion in a diesel engine.

In the experiment part, NH₃ gas was mixed into intake air of the conventional diesel engine and the combustion and the exhaust emission characteristics were investigated. As the experimental results, mixed NH₃ gas can burn and release heat. Water and nitrous oxide (N₂O) increased and carbon dioxide decreased proportionally to the NH₃ gas mixed quantity. And a diesel fuel pilot injection was able to reduce the NH₃ and N₂O emissions.

In the simulation part, the multi-zone diesel combustion model was modified to apply for diesel fuel combustion in lean mixture of NH₃. The modified model uses a chemical kinetics simulation called Cantera for predicting combustion. The results show that the predictions of heat release and cylinder pressure agreed with experimental data by adjusting the coefficients regarding of air entrainment of diesel spray in the modified model.

研究分野：内燃機関

キーワード：ディーゼル アンモニア 代替燃料 デュアルフューエル マルチゾーンモデル

1. 研究開始当初の背景

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 H₂ 輸送・貯蔵媒体等の研究開発が進められている。その中で、H₂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長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。H₂への変換なしで NH₃を直接燃焼することにより、より効率的に水素エネルギーを利用することができる。しかし、NH₃の燃焼は従来利用されている炭化水素燃料と比べて、着火温度が高く燃焼速度が遅い等の特徴がある。さらに、その燃焼過程で一酸化窒素(NO)、二酸化窒素(NO₂)、亜酸化窒素(N₂O)等を生成することが知られている。NH₃を安全かつ高効率に利用するために、その燃焼や燃焼生成物排出特性の解明が望まれている。

2. 研究の目的

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、温室効果ガスの一つである CO₂や大気汚染物質である硫黄化合物(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。また、NH₃と軽油を混焼した場合の NH₃が軽油の燃焼に与える影響や燃焼生成物の予測を目的として、ディーゼル燃焼解析モデルと化学反応計算ソフトを利用した燃焼解析プログラムを作成する。

3. 研究の方法

本研究には、単気筒ディーゼル機関(7.7 kW / 1500 min⁻¹)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。

4. 研究成果

4. 1 NH₃供給量が及ぼす影響

吸気への NH₃供給がディーゼル機関の燃焼に及ぼす影響を調べるために、出力 6 kW、回転速度 1362 min⁻¹の条件において、NH₃供給量を変更し、筒内圧力及び排ガス成分を測定した。図 1 に NH₃の供給量に対する熱効率、軽油消費量及び排ガス成分の測定結果を示す。同図の軽油消費量及び CO₂濃度は、NH₃供給量の増加に伴って低下している。これは、NH₃が燃料として作用したために、同一の出力を得るための軽油の噴射量を低減できたからである。このことから、NH₃を吸気に混合することで CO₂排出量削減に効果があることがわかる。また、熱効率の低下は僅かである。NH₃供給量は、最大で 13.3 l/min であるが、さらに供給量を増やすことで、CO₂削減効果の向上が可能であると考えられる。また、NH₃供給量の増加と共に、排ガス中の NH₃、亜酸化窒素(N₂O)、水(H₂O)濃度は増加している。しかし、NO_x濃度の大きな変化は確認できない。なお、NO_x濃度は、NO と NO₂濃度の合計値で、本実験では、NO₂は、NO_xの 1%程度であった。排ガス中の NH₃は、未燃の NH₃であり、供給量に対する割合は、12.7 から 15.5%であった。NH₃が吸気に均質に混合されているとすると、NH₃供給量によらず同程度の割合であったことから、こ

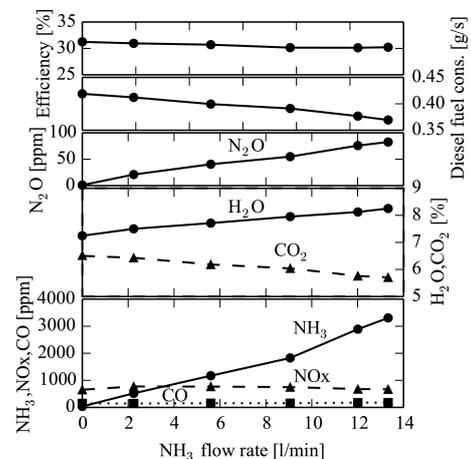


図1 NH₃供給量に対する軽油消費量と排ガス成分

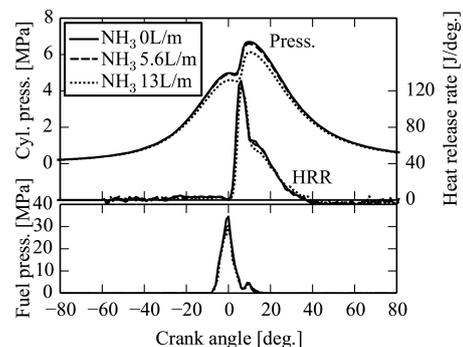


図2 NH₃噴射時の筒内圧力と熱発生率 (6 kW, 1362 min⁻¹)

の未燃 NH_3 は、シリンダ内において軽油噴霧による火炎が届かない部分に存在していたと考えられる。また、 NH_3 供給量の増加と共に N_2O の発生量が増加している。この N_2O は NH_3 の燃焼により生成されたと考えられる。図 2 に、 NH_3 供給量を 0, 5.6, 13.3 l/min とした場合の筒内圧力、燃料噴射管内圧力及び熱発生率を示す。なお、これらは 50 サイクルの平均である。同図から、 NH_3 供給量を増加すると、圧縮端圧力及び最高筒内圧力が低下する傾向が確認できる。

4. 2 Pilot 噴射による未燃 NH_3 の削減効果

図 1 に示したように、 NH_3 を吸気に混合すると、排ガス中の NH_3 と N_2O の増加が確認された。 NH_3 は人体に有害であり、 N_2O は温室効果ガスであるため、 NH_3 を燃料として使用するためには、これらの低減が必要である。そこで、HIS³⁾を用いて、軽油の pilot 噴射を行い未燃 NH_3 及び N_2O に与える影響を調査した。図 3 に、pilot 噴射のタイミングと熱効率、軽油消費量及び排ガス成分の関係を示す。このときの NH_3 供給量は、約 10 l/min、pilot 噴射量は一定である。pilot 噴射を進角するに従って、噴射タイミング-80 deg. ATDC までは、排ガス中の NH_3 濃度の低下が確認できる。一方で NH_3 の燃焼により生成されたと考えられる N_2O の増加が確認できる。また、 NO_x 及び CO 濃度の増加も確認できる。この理由

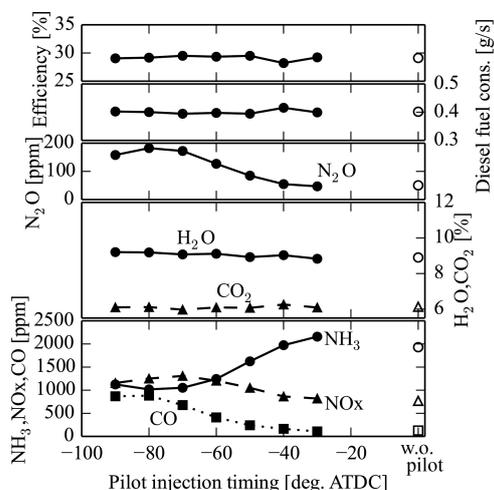


図3 pilot噴射の効果

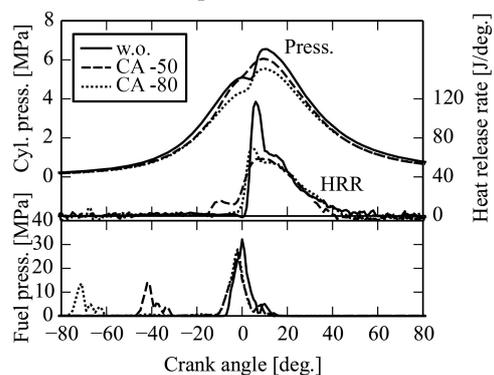


図4 pilot噴射時の筒内圧力と熱発生率 (6 kW, 1362 min⁻¹, NH_3 10 l/min)

は、pilot 噴射により、主噴射のみの場合と比較して軽油がシリンダ内の多くの範囲に分布し、燃焼時に高温になる領域が多くなり、 NH_3 の燃焼と NO_x の生成が増加したためであると考えられる。しかし、pilot 噴射を進角するに従って、軽油は、筒内の圧力及び温度が上昇する前に噴射される。このため、pilot 噴射された軽油の一部は、蒸発せずにピストン頂部やシリンダ壁面に衝突していると考えられ、空気と混合が十分でない領域が形成され、燃焼時に CO が増加したと考えられる。図 4 に、pilot 噴射タイミング-50, -80 deg. ATDC と pilot 噴射なしの場合の筒内圧力、燃料噴射管内圧力及び熱発生率を示す。噴射タイミング-80 deg. ATDC では、pilot 噴射による明確な熱発生率の変化は、確認できない。この結果からも、pilot 噴射タイミングを過大に進角した場合、シリンダ内において燃焼が不完全な部分が増加していることが示唆される。

4. 3 燃焼解析プログラム

開発した燃焼解析プログラムは、廣安らによって開発されたマルチゾーンモデルと呼ばれるディーゼル燃焼解析モデル^{4,5)}を元に作成している。このモデルは、燃焼室に噴射された燃料噴霧の微粒化・空気導入・混合気形成・着火・燃焼過程を実験式に基づいたモデルによりディーゼル噴霧燃焼を予測するものである。図 5 に燃料噴霧モデルの概要図を示す。噴射された燃料噴霧は、液柱分裂時間後、燃料質量が均等になるような微小な要素に分割される。この要素は独立しており、混合、熱移動、噴霧の追い越しが無いことが仮定されている。また、要素は噴霧到達距離の実験式に基づいて移動し、その運動量が保存されるように、速度の減少を補う量の気体を周囲から導入する。導入された高温の気体により、要素内の燃料は蒸発し混合気を形成する。開発している燃焼解析モデルは、要素内の混合気の燃焼を、モデルによる予測ではなく、Cantera⁶⁾と呼ばれる化学反応計算ソフトを利用している。Cantera は、化学反応機構を変更することで、多種の燃料や吸気の組成に対応することができる。表 1 に元にしたモデルからの変更点を示す。また、図 6 に要素内の燃焼計算フロー図を示す。要素は独立しているため、各要素内の燃焼計算は、並列処理により計算される。本研究では、化学反応機構に diesel surrogates reduced mechanism⁷⁾を用いた。

4. 4 計算結果と実験結果の比較

燃焼解析プログラムの検証として単気筒ディーゼル機関の実験結果との比較を実施した。表 2 に単気筒ディーゼル機関の諸元と計算に用いた条件を示す。また、モデル内の空気導入量に関する係数は、図 7(a)に示される実験結果から得られた熱発生率とモデルによる予測結果が合うように調整した。着火後からピストンキャビティ壁面到達までが 0.3 とし、その他は 1.6 とした。

図7は、高負荷 (1363 min^{-1} , 42 Nm) 及び低負荷 (949 min^{-1} , 21 Nm) における予測結果と実験結果の比較である。図7(a)に示される様に、空気導入量に関する係数を調整することで、予測結果は実験結果と良く一致することが分かる。図7(b)は、高負荷と同様の空気導入量に関する係数を用いて、低負荷における実験結果との比較を示している。予混合燃焼期間の熱発生率がやや大きい、予測結果は実験結果と良く一致している。

4. 5 まとめ

本研究では、単気筒ディーゼル機関を用いて、軽油と NH_3 を混合燃焼させた実験の結果、下記の知見を得た。

- ディーゼル機関の吸気に NH_3 ガスを混合し、 NH_3 を軽油と共に燃焼させることで、 CO_2 削減効果を得ることができる。
- NH_3 供給量の増加と共に、排ガス中の NH_3 、 N_2O 、 CO 、 H_2O 濃度は増加し、 CO_2 濃度は低下する。
- pilot 噴射を用いて未燃 NH_3 の低減が可能である。

表1 モデルの変更部分

Fuel droplet evaporation	Spalding model ⁸⁾
Ignition delay	Using Cantera
Heat release	Using Cantera
Heat loss to cylinder wall	Ignored

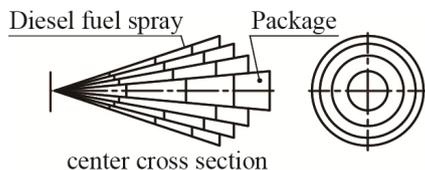


図5 燃料噴霧モデル概要

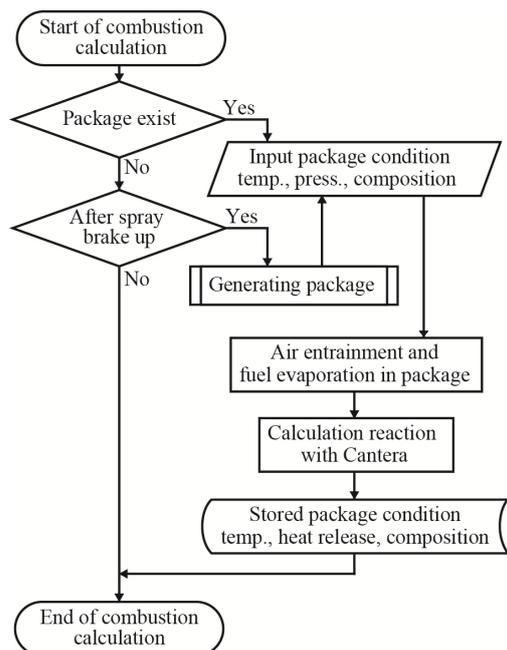


図6 燃焼計算フロー

化学反応計算ソフトにより燃焼部分を計算するディーゼル燃焼解析プログラムを作成し、予測結果と実験結果の比較を行い下記の知見を得た。

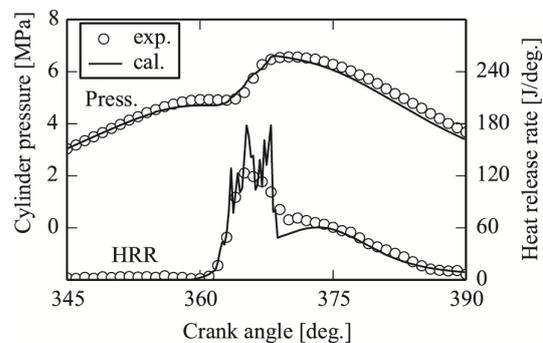
- 化学反応計算ソフトにより燃焼部分を計算するディーゼル燃焼解析プログラムを作成した。
- 作成したモデルによる熱発生率の予測結果は、空気導入量に関する係数を調整することで、実験結果と概ね一致する。

参考文献

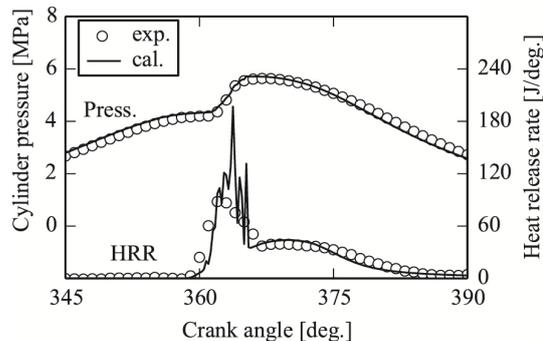
- 1)小島、市川、水素エネルギーシステム Vol.36, No.4, 34-41, 2011
- 2)小池ら、日本燃焼学会誌、第58巻184号、35-42, 2016.
- 3)西尾ら、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.47, No.1, 65-70, 2012.
- 4)廣安ら、機論、Vol.48, No.432, 1606-1613, 1982.
- 5) T. Yoshizaki, et al, SAE Paper 930612, 1993.
- 6)D. G. Goodwin, et al, <http://www.cantera.org>

表2 機関諸元及び計算条件

Bore	112 mm	Speed	1363 949 min^{-1}
Stroke	110 mm	Fuel mass	38 23 mg/cycle
Con. rod	0.198 mm	Inj. timing	-5 deg.ATDC
Compression ratio	18.5	Inj. dur.	9 5 deg.
Cavity bore	60 mm	Inj. press.	23 16 MPa
Nozzle hole dia.	0.31 mm	Fuel	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$
Nozzle hole	4	Charge temp.	323 K



(a) 高負荷 (1363 min^{-1} , 42 Nm)



(b) 低負荷 (949 min^{-1} , 21 Nm)

図7 筒内圧力及び熱発生率の予測結果と実験結果の比較

7)E. Ranzi, et al, Int. J. Chem. Kinetics, Vol.46, No. 9, 512-542, 2014.

8)D. B. Spalding, Fourth Symposium (International) on Combustion, 847-864, 1953.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Multi-zone diesel combustion model for prediction of combustion in lean mixture of gaseous fuel, 日本マリンエンジニアリング学会誌 v53.3(2018)

[学会発表] (計 6 件)

①アンモニアを用いたディーゼル機関の混焼運転、海上技術安全研究所研究発表会 (2016)

② Effect of Ammonia Gas Mixed into Intake Air on Combustion and Emissions Characteristics in Diesel Engine, ASME 2016 Internal Combustion Fall Technical Conference (国際学会) (2016)

③アンモニアを用いたディーゼル機関の混焼運転、第 86 回マリンエンジニアリング学術講演会(2016)

④現象論モデルと詳細化学反応計算によるディーゼル燃焼解析、第 87 回マリンエンジニアリング学術講演会 (2017)

⑤Multi-zone diesel combustion model for prediction of combustion in lean mixture of gaseous fuel, 11th International Symposium on Marine Engineering (国際学会) (2017)

⑥水素エネルギーキャリアの船舶輸送及び利用に関する検討、第 26 回交通・物流部門大会講演集(2017)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

仁木 洋一 (Yoichi Niki)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術

研究所 海上技術安全研究所 主任研究員

研究者番号 : 10511587

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号 :

(4)研究協力者

()