

# アンモニア混焼ディーゼルエンジンに関する研究 —アンモニアが燃焼と排ガス成分に及ぼす影響と 未燃アンモニアと亜酸化窒素の低減—

仁木 洋一\*

## Effects of NH<sub>3</sub> on Combustion and Emissions, and Reduction in Unburned NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O Emissions of NH<sub>3</sub>-Diesel Dual-Fuel Engines

by

NIKI Yoichi\*

### Abstract

Carbon-free fuels including ammonia (NH<sub>3</sub>) and hydrogen (H<sub>2</sub>) have been investigated as alternative fuels for internal combustion engines to reduce carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions. International shipping companies are focusing on NH<sub>3</sub> as an alternative fuel as it is easily liquefied and stored compared with H<sub>2</sub>. However, NH<sub>3</sub> combustion in diesel engines, which are used for ship power systems, generate nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions, which contribute to the greenhouse effect; however, the N<sub>2</sub>O formation mechanisms remain unclear. In this study, the combustion of premixed NH<sub>3</sub> initiated by a pilot fuel was investigated experimentally and numerically. The energy fraction of NH<sub>3</sub> was increased by up to 80% in the experiments. The results showed the following changes in combustion and emission characteristics. As the energy fraction of NH<sub>3</sub> increased, the onset of combustion was delayed. Nitric monoxide, unburned NH<sub>3</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions increased, whereas carbon monoxide emissions decreased as the energy fraction of NH<sub>3</sub> increased. However, the increase in N<sub>2</sub>O diminished when the energy fraction of NH<sub>3</sub> increased by 40% or more. Computation fluid dynamics simulations reproduced the experimental results in terms of the changes in combustion and emissions caused by the presence of NH<sub>3</sub>. The numerical analysis contributes to the understanding of NH<sub>3</sub>-diesel dual-fuel combustion. The simulation suggested that an early injection of pilot fuel enabled the pilot fuel to distribute across a wide area in the combustion chamber and reduced the unburned NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. The reduction effect was verified in the experiments using an experimental single-cylinder diesel engine.

---

\* 環境・動力系

原稿受付 令和 6年 1月 17日

審査日 令和 6年 2月 19日

## 目 次

1. まえがき	42
2. NH <sub>3</sub> が燃焼と排ガス成分に及ぼす影響	43
2.1 船用中速ディーゼルエンジンによるNH <sub>3</sub> 混焼	43
2.2 小型単気筒ディーゼルエンジンによるNH <sub>3</sub> 混焼	44
3. 未燃NH <sub>3</sub> とN <sub>2</sub> O排出量の低減手法の開発	46
3.1 数値計算を用いたシリンダ内での未燃NH <sub>3</sub> とN <sub>2</sub> Oの生成過程の解析	46
3.2 小型単気筒ディーゼルエンジンによるパイロット燃料の噴射時期変更	50
4. まとめ	50
謝 辞	51
References	51

## 記 号

$C_{CO_2}$ : 排ガス中の二酸化炭素濃度	[%]
$C_{N_2O}$ : 排ガス中の二酸化窒素濃度	[ppm]
$GWP_{N_2O}$ : 二酸化窒素の温室効果係数	[-]
$Q_{exh}$ : 排ガス流量	[m <sup>3</sup> /h]
$MW_{CO_2}$ : 二酸化炭素のモル質量	[g/mol]
$MV_{CO_2}$ : 二酸化炭素のモル体積	[m <sup>3</sup> /mol]
$P$ : エンジン出力	[kW]

## 1. まえがき

温室効果ガス（GHG）の削減は、海事分野においても強く求められている。国際海事機関（IMO）は、2018年に採択したGHG削減戦略を2023年に改訂し、2050年頃までにGHG排出ゼロとする新たな目標を採択した。さらに、2008年比で2030年までにGHG排出を20～30%、2040年までに70～80%削減することをGHG排出ゼロ達成のための今後の削減目安とした<sup>1)</sup>。

船舶からのGHG排出量低減のために、運航方法の改善や船型の改良などの技術が採用されている。また、風力などの自然エネルギーの利用の他、船の推進や船内電力の発電に利用されている船用ディーゼルエンジンでの代替燃料の使用によるGHG削減技術の検討が行われている。代替燃料としては、水素やアンモニア（NH<sub>3</sub>）などのカーボンフリー燃料があげられる。NH<sub>3</sub>は、燃焼しても二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を排出しない特徴や容易に液化させることが可能であり、水素に比較して貯蔵や運搬が容易であるため、運航時に多量の燃料が必要な船舶において、その燃料としての利用が注目されている。一方、NH<sub>3</sub>は、現在用いられている軽油・重油よりも着火や燃焼性が悪いため、燃料として利用するための研究開発が必要である。

海上技術安全研究所（海技研）では、2015年度よりNH<sub>3</sub>をディーゼルエンジンの燃料として利用する試みを始め<sup>2)</sup>、海技研所内の船用中速ディーゼルエンジン及び小型単気筒ディーゼルエンジンを用いて研究開発を進めてきた<sup>3)</sup>。本報告は、これまでに実施したNH<sub>3</sub>の燃料利用に関する研究<sup>3-6)</sup>をまとめたものである。NH<sub>3</sub>の燃料利用に関する研究は、NH<sub>3</sub>がディーゼルエンジンの燃焼や排ガス成分に与える影響の調査と排ガス中の未燃NH<sub>3</sub>と亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）の低減方法の研究開発に大きく分けられる。得られた研究成果の中から、主な成果を報告する。

## 2. NH<sub>3</sub>が燃焼と排ガス成分に及ぼす影響

NH<sub>3</sub>をエンジンの燃料として使用する場合、エンジンの吸入する空気に混合し燃焼させるか、シリンダ内に直接噴射し燃焼させる方法がある。しかし、NH<sub>3</sub>は、単体では着火・燃焼しづらいため、NH<sub>3</sub>を燃料として利用する場合、着火・燃焼のためにパイロット燃料が用いられる。パイロット燃料には、NH<sub>3</sub>と比較して着火・燃焼性に優れた軽油や重油が用いられる。海技研では、NH<sub>3</sub>をエンジンの吸入する空気に混合する方式を採用して研究開発を実施した。

### 2.1 船用中速ディーゼルエンジンによるNH<sub>3</sub>混焼

実験に用いた船用中速ディーゼルエンジンの諸元を表 2.1 に示す。実験では、A 重油によって運転されるエンジンの給気に、NH<sub>3</sub>ガスを混合することでNH<sub>3</sub>をA 重油と混焼した。エンジンの出力、回転速度は、750 kW、1000 min<sup>-1</sup>を100%とした船用負荷特性において25%(188 kW, 630 min<sup>-1</sup>), 50%(375 kW, 794 min<sup>-1</sup>), 75%(563 kW, 909 min<sup>-1</sup>)の負荷率で運転した。A 重油の噴射量は、設定した回転速度を維持するために调速機によって自動で調整される。そのため、給気へのNH<sub>3</sub>の供給量の増加と共に、A 重油は自動的に減少することとなる。NH<sub>3</sub>は、液化NH<sub>3</sub>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<sub>3</sub>を供給した。液化NH<sub>3</sub>ボンベの温度は、NH<sub>3</sub>ガスの供給に従ってNH<sub>3</sub>の気化熱により減少する。よって、NH<sub>3</sub>供給量が多量の場合、NH<sub>3</sub>供給圧力を維持することが難しく、一定の流量の安定した供給が困難になる。そのため、NH<sub>3</sub>供給量が多い場合の実験条件では、5分程度毎にNH<sub>3</sub>供給量を変化させて測定を実施した。測定値は、測定条件を変化させる直前の約1分間の測定値の平均とした。この場合、潤滑油や排ガス温度などエンジンの状態は十分な定常状態ではなかったと考えられるが、本研究の測定項目である排ガス成分については、十分に変化が収まった状態であると判断した。

各負荷率におけるNH<sub>3</sub>混焼率（エンジンに供給しているA 重油とNH<sub>3</sub>の発熱量の合計に対するNH<sub>3</sub>の発熱量割合）を変化させた場合の排ガス成分の変化とGHG排出率を図 2.1 に示す。ここで、GHG排出率は、N<sub>2</sub>Oの温室効果係数を考慮して、CO<sub>2</sub>排出率に換算した値である。算出は下記の式を用いた。

$$\text{GHG 排出率 [g/kWh]} = \frac{\left(\frac{C_{\text{CO}_2}}{100} + \frac{C_{\text{N}_2\text{O}} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}}{1000000}\right) Q_{\text{exh}}}{MV_{\text{CO}_2}} MW_{\text{CO}_2} \frac{1}{P} \quad (2.1)$$

ここで、N<sub>2</sub>Oの温室効果係数（GWP<sub>N<sub>2</sub>O</sub>）には、265を用いた<sup>7)</sup>。図 2.1 に示されるNH<sub>3</sub>混焼率は、NH<sub>3</sub>ガスの供給量の上限が約900 L/minであったため、エンジンの負荷率の増加と共に小さくなっている。図 2.1 に示すように、すべての負荷率において、NH<sub>3</sub>混焼率の増加と共に、CO<sub>2</sub>排出率が減少している。ただし、NH<sub>3</sub>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<sub>3</sub>混焼率の上昇に伴い増加している。これは、N<sub>2</sub>O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<sub>3</sub>混焼率が20%より大きくなると、N<sub>2</sub>O排出量の増加が抑えられたため、NH<sub>3</sub>混焼率と共に増加していたGHG排出率は減少している。NH<sub>3</sub>混焼率32%の場合、NH<sub>3</sub>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。

表 2.1 船用中速ディーゼルエンジンの諸元

4 ストローク過給器中間冷却器付ディーゼルエンジン	
ボア/ストローク	190/260 mm
シリンダ数	6
圧縮比	13.8

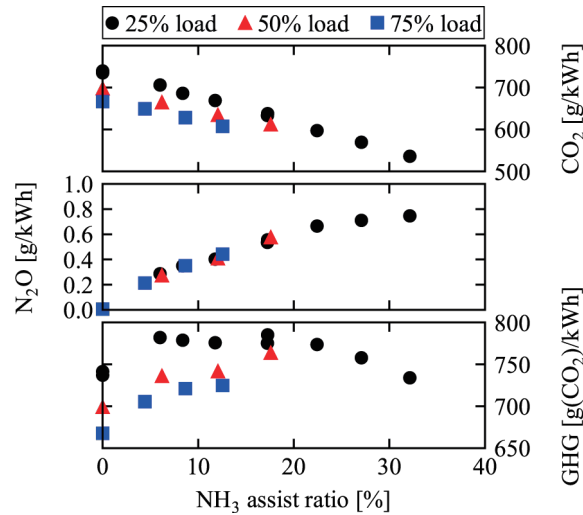


図 2.1 中速船用ディーゼルエンジンでの NH<sub>3</sub> 混焼結果<sup>3)</sup>

2.2 小型単気筒ディーゼルエンジンによる NH<sub>3</sub> 混焼

実験装置の全体図を図 2.2 に示す。実験装置は、小型単気筒ディーゼルエンジン及びアンモニア供給装置、排ガス分析器からなる。実験では、パイロット燃料に軽油を用い、ディーゼルエンジンの吸気に NH<sub>3</sub> を混合することで、NH<sub>3</sub> と軽油の混焼を行った。軽油噴射には、ソレノイド式の電子制御噴射弁使用し、100 MPa に加圧された軽油が燃料噴射弁に供給される。エンジンの諸元を表 2.2 に示す。また、エンジンの負荷として渦電流式の負荷装置がエンジンの出力軸に接続され、設定した回転速度となるようにトルクが制御され出力が調整される。排ガス分析は、FTIR 式分析器（岩田電業 FAST-2200）によって、一酸化炭素 (CO)、CO<sub>2</sub>、一酸化窒素 (NO)、二酸化窒素 (NO<sub>2</sub>)、NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O の濃度を測定し、FID 式分析器 (CAI 6000HFID) により炭化水素 (HC) を測定した。また、フィルタスモークメータ (AVL 415S) を用いてスモークを測定した。

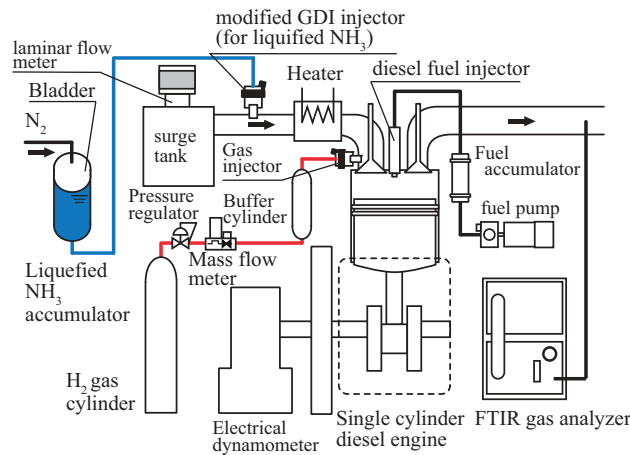


図 2.2 小型単気筒ディーゼルエンジン実験装置概要<sup>4)</sup>

表 2.2 小型単気筒ディーゼルエンジンの諸元

4 ストローク自然吸気ディーゼルエンジン	
ボア/ストローク	112/110 mm
シリンダ数	1
圧縮比	18.5
噴射弁	6x0.13-149°

NH<sub>3</sub> 混焼率と排ガス成分の変化を図 2.3 に示す。エンジンの出力、回転速度は、約 8 kW, 1500 min<sup>-1</sup> である。また、パイロット燃料の噴射時期は、-10° aTDC (上死点后) 一定にした。実験では、供給する NH<sub>3</sub> と軽油の量を調整することで、出力を一定に保ったまま NH<sub>3</sub> 混焼率を変化させた。図 2.3 に示されるように、前項の船用中速ディーゼルエンジンの場合と同様に、NH<sub>3</sub> 混焼率と共に CO<sub>2</sub> が削減されていることが分かる。また、CO とスモークは NH<sub>3</sub> 混焼率の増加と共に低減する傾向がみられる。NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>) は、NH<sub>3</sub> 混焼率が 20%程度まではわずかに低減する傾向が見られるが、それ以上の NH<sub>3</sub> 混焼率では増加している。未燃 NH<sub>3</sub> は、NH<sub>3</sub> 混焼率に比例して増加している。ただし、図 2.3 に示される 3000 ppm 以上の NH<sub>3</sub> 濃度は、測定器の検量線上限を超えているため参考値である。N<sub>2</sub>O は、NH<sub>3</sub> 混焼率が 20%程度の場合まで増加するが、80 ppm 程度で留まり、NH<sub>3</sub> 混焼率が 20%以上では、ほぼ一定になっている。図 2.3 の右最下部に GHG 排出率を示している。この GHG 排出率は、前項の式 2.1 を使用して算出した。GHG 排出率は N<sub>2</sub>O の排出傾向に大きく影響されており、N<sub>2</sub>O 濃度の増加が収まる NH<sub>3</sub> 混焼率 20%以上から、NH<sub>3</sub> 混焼率の増加による GHG 排出率の低減がみられる。

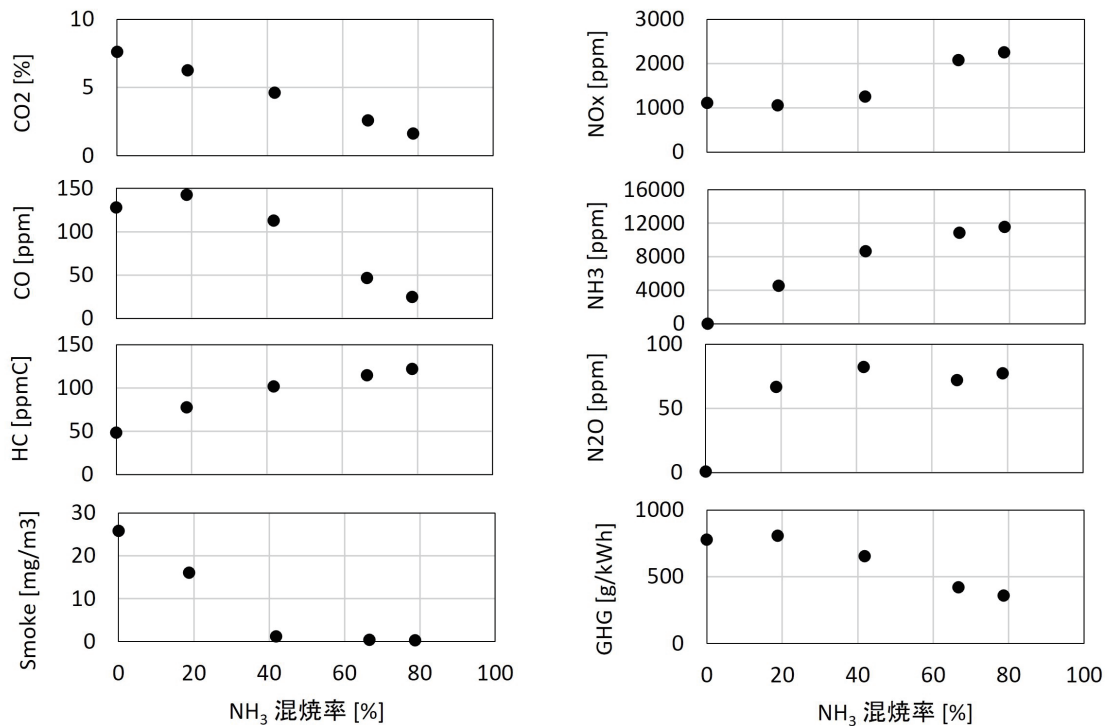


図 2.3 小型単気筒ディーゼルエンジンでの NH<sub>3</sub> 混焼結果

NH<sub>3</sub> 混焼率別の筒内圧力と熱発生率を図 2.4 に示す。NH<sub>3</sub> 混焼率の増加に伴い、着火時期 (熱発生率の急激な上昇開始点) が遅れていることが分かる。また、着火後に急激に上昇する熱発生率の最大値の増加も確認できる。この着火後の熱発生率の急激な上昇は、軽油の噴射後から着火までの間に、噴射された一部の軽油と NH<sub>3</sub> の予混合気 (空気と NH<sub>3</sub> が混合した気体) の燃焼によるものと思われる。NH<sub>3</sub> 混焼率の増加に伴う熱発生率最大値の増加は、予混合成分として燃焼する NH<sub>3</sub> が増加したためであると推察される。

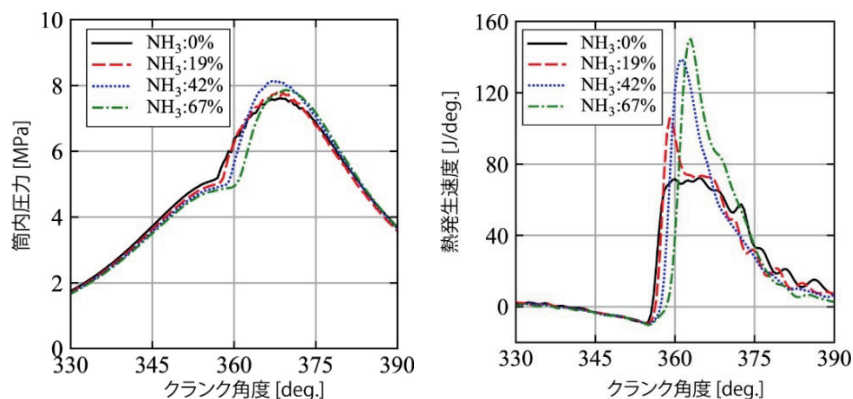


図 2.4 NH<sub>3</sub> 混焼による燃焼圧力の変化<sup>5)</sup>

### 3. 未燃 NH<sub>3</sub> と N<sub>2</sub>O 排出量の低減手法の開発

2章に示したように、ディーゼルエンジンにおいて NH<sub>3</sub> をエンジンの吸入する空気に混合し軽油や重油をパイロット燃料として混焼する場合、NH<sub>3</sub> の供給量と共に CO<sub>2</sub> の排出量が削減される。しかし、未燃の NH<sub>3</sub> や温室効果ガスである N<sub>2</sub>O が排出されることが明らかになった。NH<sub>3</sub> は毒性や腐食性があり、N<sub>2</sub>O の温室効果係数は CO<sub>2</sub> の 265 倍と試算されており<sup>7)</sup>、これらの低減が必要である。そこで、これらの低減のために、小型単気筒ディーゼルエンジンを対象に数値流体計算 (CFD) によりシリンダ内での NH<sub>3</sub> の燃焼過程を解析し、未燃 NH<sub>3</sub> と N<sub>2</sub>O の低減手法開発を試みた。さらに、検討した手法を小型単気筒ディーゼルエンジンに適用して、その効果を確認した。本章ではその結果を報告する。

#### 3.1 数値計算を用いたシリンダ内での未燃 NH<sub>3</sub> と N<sub>2</sub>O の生成過程の解析

数値計算には、オープンソースの CFD ソフトウェアである OpenFOAM v8 を使用した。OpenFOAM は、流れの計算に加えて、化学反応機構を利用した気体成分の化学反応の解析が可能である。さらに、高圧噴射される燃料噴霧のモデルやエンジン用のソルバーを備えている。数値計算に使用したモデルを図 3.1 に示す。計算領域は、実験に使用した小型単気筒ディーゼルエンジンのピストン形状を元に、6 穴の燃料噴射ノズルから噴射される燃料噴霧の 1 つ分を含む中心角が 60° の扇形を切り出した形状とした。ピストン内のボウルの位置はピストンの中央ではないが、数値計算では中央にボウルがある形状を想定した。また、バルブ形状や吸気に伴うシリンダ内の流れは考慮しておらず、シリンダ内の雰囲気は静止状態の NH<sub>3</sub> と空気の混合気として、圧縮行程の下死点から計算を開始した。数値計算は、排気弁開時期である 140° aTDC まで行った。数値計算の詳細な設定については、参考文献<sup>8)</sup>に記載している。

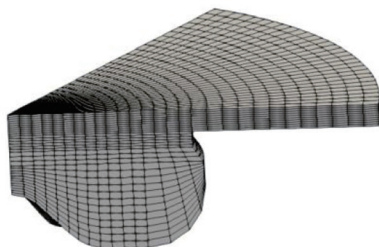


図 3.1 数値計算に使用したシリンダ内モデル (シリンダ内 60° 分の扇形)<sup>6)</sup>

また、数値計算では、軽油と同等の着火性を持つヘプタンをパイロット燃料としてシリンダ内に噴射した。燃焼の数値計算に用いる化学反応機構は、ヘプタンと NH<sub>3</sub> 燃焼の機構を組み合わせた機構を新たに作成した<sup>6)</sup>。CFD



を用いて、回転速度、出力及び軽油噴射時期をそれぞれ、 $1500 \text{ min}^{-1}$ ,  $8 \text{ kW}$ ,  $-10^\circ \text{ aTDC}$  と一定にして、 $\text{NH}_3$ の混焼率を変更した実験を模擬する計算を行った。図 3.2 に、筒内圧力と熱発生率の数値計算結果と実験結果の比較を示す。 $\text{NH}_3$ 混焼率が 0%の場合、熱発生率の数値計算結果は、燃焼の開始時の最大値が、実験結果よりも過大になっている。この傾向は、 $\text{NH}_3$ 混焼時の数値計算結果にも見られる。一方で、 $\text{NH}_3$ 混焼率 44%の場合、数値計算結果は、 $\text{NH}_3$ 混焼率が 0%の場合と比較して、熱発生率の最大値の増加とクランク角度  $0^\circ$ 以降の熱発生率の低下といった熱発生率の変化を定性的に再現できている。 $\text{NH}_3$ 混焼率 80%の場合、 $\text{NH}_3$ 混焼率 44%と比較して熱発生率の最大値の低下とそれに続く燃焼部分の増加といった変化が、数値計算結果においても見られる。しかし、実験結果を十分に再現はできていない。図 3.3(a)に、数値計算結果の排ガス組成と実験により得られた排ガス組成の比較を示す。ここで、記載した数値計算結果の排ガス組成は、数値計算終了時の排ガス組成である。図 3.3(b)に $\text{NH}_3$ 混焼率 44%の場合の結果を使って規格化した排ガス組成の数値計算結果と実験結果の比較を示す。図 3.3(a)に示すように、 $\text{NH}_3$ 混焼率が低い場合に  $\text{CO}$ の生成量が多いことや数値計算結果の  $\text{CO}_2$ 濃度が実験結果よりもやや低くなっている。これらの原因として、数値計算に使用した化学反応機構の他、シリンダ内の空気の初期状態やシリンダ内のモデルが簡易的な形状であること、オーバーラップ時の吹き抜けなどの影響が考えられる。図 3.3(a)に示されるように、排ガス成分の数値計算結果は、実験結果との差は大きいですが、図 3.3(b)に示すように、 $\text{NH}_3$ 混焼率の増加に対する排ガス成分の変化は、数値計算により実験結果が定性的に再現されている。数値計算において、実験結果に見られる  $\text{NH}_3$ 混焼による熱発生率や排ガス成分の変化が定性的に再現されていることから、本数値計算では、概ねシリンダ内の状況が再現できており、未燃  $\text{NH}_3$ や  $\text{N}_2\text{O}$ のシリンダ内の分布の解析に対して有用であると考えられた。そこで、シリンダ内の排ガス成分の変化を解析した。

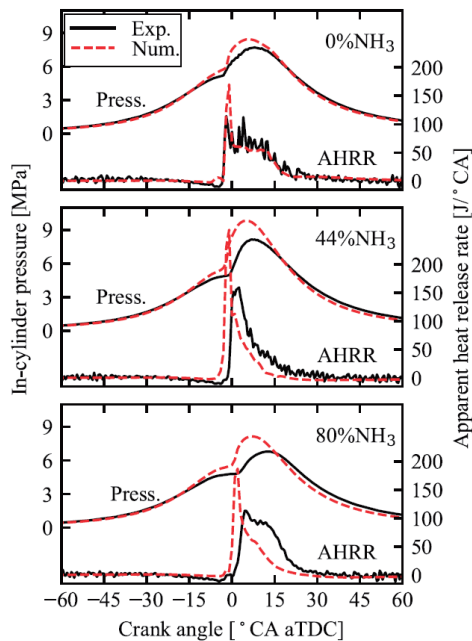


図 3.2 数値計算と実験結果の燃焼圧力の比較<sup>6)</sup>

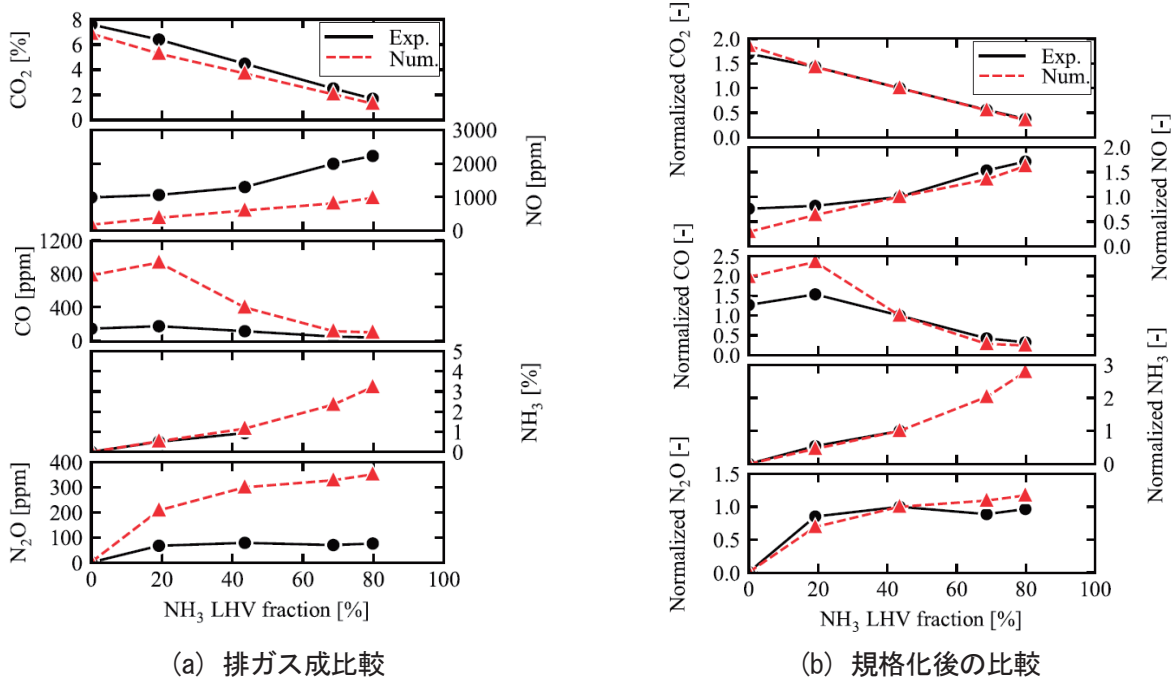


図 3.3 数値計算と実験結果の排ガス成分の比較<sup>6)</sup>

図 3.4 に、数値計算によるシリンダ内の CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O の燃焼時の分布の変化を示す。それぞれの図は、図 3.1 に示した計算モデルの中心、すなわちパイロット燃料噴霧の中心を通る断面図である。クランク角度 $-2^{\circ}$  aTDC において CO<sub>2</sub> の増加が見られ、その後クランク角度の増加と共に CO<sub>2</sub> が増加している。CO<sub>2</sub> の分布に着目すると、図中左側（ピストンの中心付近）と図中右側（シリンダの壁面付近）では、CO<sub>2</sub> の増加が見られない。これは、パイロット燃料がピストン中心からピストンボウル部の壁面に噴射されるため、ピストンの中心付近やシリンダ壁面付近には分布していないからである。NH<sub>3</sub> 分布の変化を見ると、シリンダ内に一様に分布している NH<sub>3</sub> が、CO<sub>2</sub> の増加する領域で減少している。一方で、上述した CO<sub>2</sub> の増加が少ない領域では、NH<sub>3</sub> が残存している。また、N<sub>2</sub>O は、NH<sub>3</sub> の反応が進んでいる領域で生成されるが、クランク角度の増加と共に減少することが分かる。クランク角度  $4^{\circ}$  aTDC では、NH<sub>3</sub> の残存する領域と減少する領域の境目付近に N<sub>2</sub>O が残存していることが分かる。これらの数値計算の結果から、NH<sub>3</sub> は、シリンダ内のパイロット燃料が分布している部分において反応が進むが、パイロット燃料が分布していない領域に残存していること。N<sub>2</sub>O は、NH<sub>3</sub> の分解と共に生成され NH<sub>3</sub> の残存する領域との境目付近に残存することが予測された。この結果から、パイロット燃料をシリンダ内に広く分散し、NH<sub>3</sub> の残存する領域を少なくすることで、未燃 NH<sub>3</sub> と N<sub>2</sub>O の排出を低減できるのではないかと考えた。

図 3.5 に図 3.4 と同程度の NH<sub>3</sub> 混焼率において、シリンダ内へのパイロット燃料の分散を促進させるために、パイロット燃料の噴射時期を早めた（進角した）場合の数値計算結果を示す。図 3.5 に示されるように、CO<sub>2</sub> の分布する領域が全体に広がっている効果が得られている。NH<sub>3</sub> が減少する領域も拡大され、クランク角度 $-3^{\circ}$  aTDC では、残存する NH<sub>3</sub> は、ほとんど見られない。N<sub>2</sub>O は、燃焼の初期段階では図 3.4 の場合と同様に NH<sub>3</sub> の残存する領域との境目付近に生成されているが、その後、N<sub>2</sub>O は減少しピストンボウルの下部付近に僅かに残存するのみとなっている。

小型単気筒ディーゼルエンジンを模擬した数値計算では、定性的ではあるが NH<sub>3</sub> 混焼状態の燃焼や排ガス生成を再現できた。また、パイロット燃料の噴射時期を進角することで、パイロット燃料のシリンダ内の分布を促進し、未燃 NH<sub>3</sub> と N<sub>2</sub>O を低減できる可能性が示された。



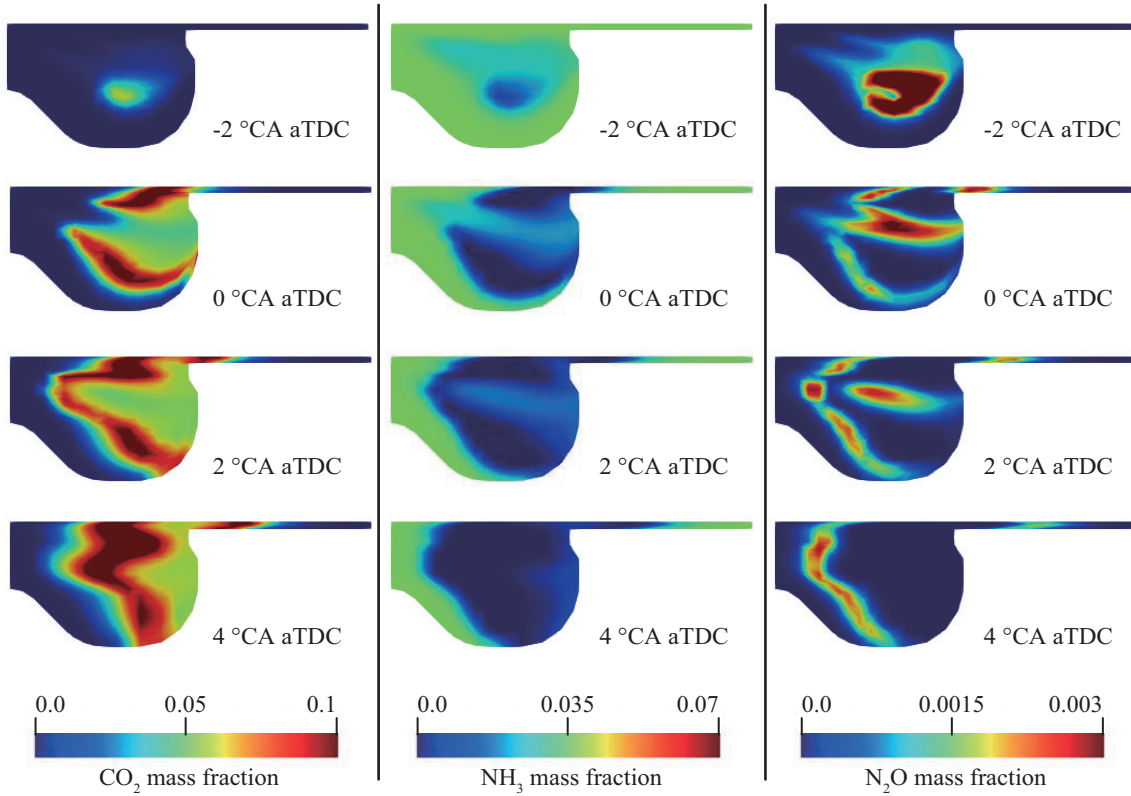


図 3.4 シリンダ内の分布図 (混焼率 44% パイロット燃料の噴射時期:  $-10^{\circ}$  aTDC) <sup>6)</sup>

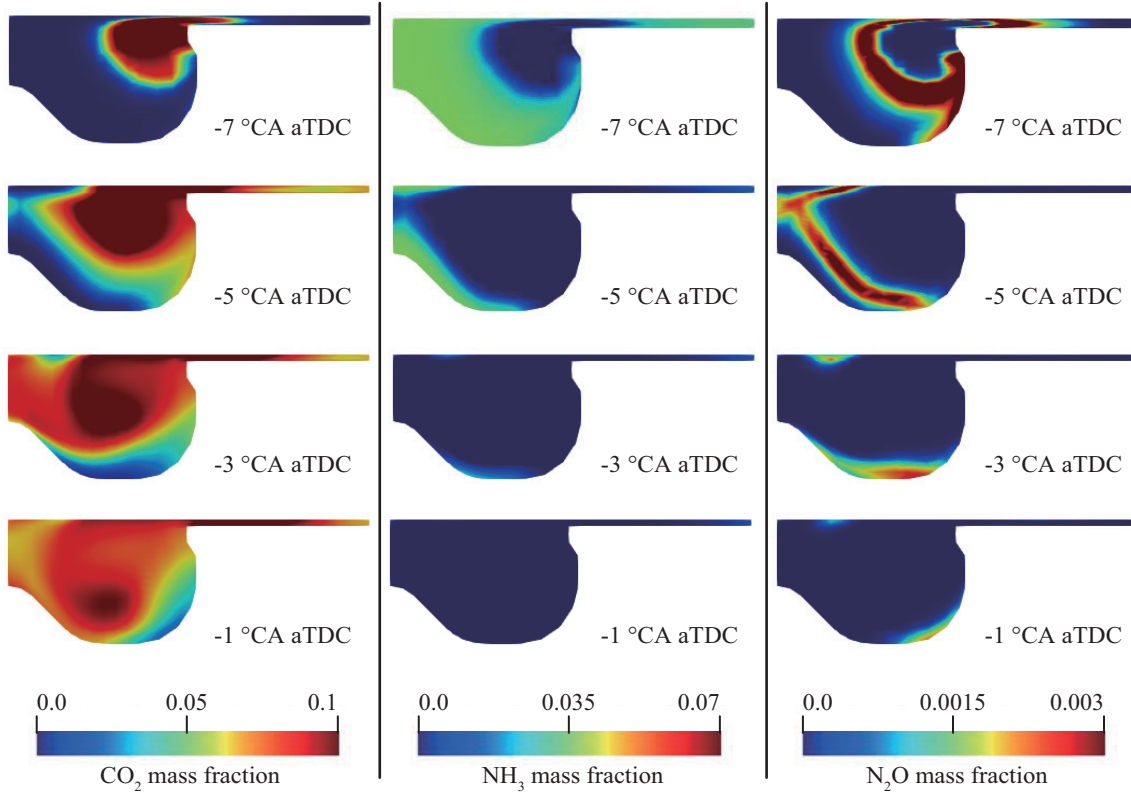


図 3.5 シリンダ内の分布図 (混焼率 42% パイロット燃料の噴射時期:  $-40^{\circ}$  aTDC) <sup>6)</sup>

### 3.2 小型単気筒ディーゼルエンジンによるパイロット燃料の噴射時期変更

前節では、数値計算を用いて、パイロット燃料の噴射時期 (SOI) を早めること (進角) が、未燃  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{O}$  の低減に効果があることが予測された。本節では、小型単気筒ディーゼルエンジンにより、SOI を早める実験を行い、数値計算により予測された効果を実験により確認した結果を報告する。

図 3.6 に、エンジン回転速度、出力、パイロット燃料と  $\text{NH}_3$  供給量を一定として、SOI を  $-10^\circ$  aTDC から  $-60^\circ$  aTDC まで変更した結果を示す。なお、 $\text{NH}_3$  混焼率はそれぞれ 42, 54, 68% として実施した。 $\text{NH}_3$  混焼率が 42 及び 54% の場合は、SOI が  $-40^\circ$  aTDC あたりにおいて、未燃  $\text{NH}_3$  は、数千 ppm 程度に、 $\text{N}_2\text{O}$  は、80 ppm 程度から 20 ppm 程度に急激に減少した。このように、SOI の進角により、数値計算により予測された未燃  $\text{NH}_3$  と  $\text{N}_2\text{O}$  の低減効果が実証された。一方で、その他の排ガス成分にも SOI の進角による影響が確認された。 $\text{NO}_x$  は、SOI が  $-40^\circ$  aTDC 付近までは増加し、その後、SOI の進角と共にわずかに低下している。また、CO や HC は、SOI の進角と共に増加している。SOI の進角によって、シリンダ内に広く分散したパイロット燃料である軽油の一部は、シリンダ内部において比較的低温部分であるシリンダの壁面付近へ到達していると予測される。比較的低温部分では燃焼が十分に進まず、軽油由来の不完全燃焼成分である CO 及び HC の増加が引き起こされていると考えられる。さらに、 $\text{NH}_3$  混焼率が高い場合は、SOI の進角によって着火・燃焼が不安定になり  $\text{NH}_3$  と  $\text{N}_2\text{O}$  の低減は実現できなかった。図 3.6 右最下部に、燃焼の不安定度の指標として最大筒内圧力の変動係数 (COV Pmax) を示す。この値が大きいほど燃焼が不安定であることを示しており、 $\text{NH}_3$  混焼率が高い場合に、SOI の進角によってこの変動係数が増加することがわかる。これは、高い  $\text{NH}_3$  混焼率ではパイロット燃料の噴射量が少なく、SOI を進角した場合に、パイロット燃料として噴射された軽油が分散し、希薄化が過大となり、着火・燃焼が不安定になっていると考えられる。

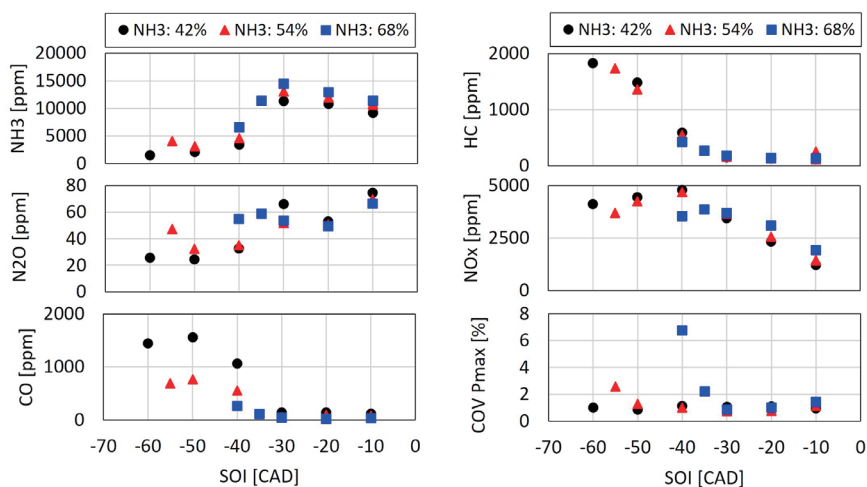


図 3.6 パイロット燃料の噴射時期 (SOI) を進角した場合の排ガス成分の変化

## 4. まとめ

本報告では、これまでに海技研で実施した  $\text{NH}_3$  の燃料利用に関する研究成果から主な成果を報告した。海技研では、国内エンジンメーカーに先んじて、船用中速ディーゼルエンジンを用いて A 重油と  $\text{NH}_3$  を混焼した。その結果、未燃の  $\text{NH}_3$  や温室効果ガスである  $\text{N}_2\text{O}$  が排出されることを明らかにした。また、小型単気筒ディーゼルエンジンによる実験、CFD を用いた数値計算による  $\text{NH}_3$  混焼状態の解析を実施し、未燃  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{O}$  の低減手法を開発した。

## 謝 辞

本報告では、重点研究「多様なエネルギー源等を用いた新たな船用動力システムの開発に関する研究」の成果の一部を紹介した。また、本研究の一部はJSPS科研費 20K04946の助成を受けたものです。ここに記して関係各位に謝意を表します。

## References

- 1) International Maritime Organization, IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, resolution MEPC.377(80), (2023).
- 2) Niki Y, Final research report, Effects of ammonia gas mixed into intake air on combustion and emissions characteristics in diesel engine, <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-15K18298/> (as of Jan. 10 2023) (In Japanese)
- 3) Niki Y., Ichikawa Y., Nitta Y. and Hirata K., Current status of research and development for ammonia/diesel dual-fuel engine, PS-10 (2021), [https://www.nmri.go.jp/event/presentation/R3/poster\\_10.pdf](https://www.nmri.go.jp/event/presentation/R3/poster_10.pdf) (as of Jan. 10 2023) (In Japanese)
- 4) Niki Y, Hirata K, Kobayashi K and Shimizu Y, Effects of hydrogen on combustion in ammonia-diesel dual fuel engine and demonstration of autothermal catalyst to reform ammonia into hydrogen, Proceedings of the ASME 2023 ICE Forward Conference, ICEF2023-109103 (2023)
- 5) Niki Y, Low-temperature/low-pressure synthesis of ammonia and new utilization technology (2023), pp.313-320, Technical Information Institute CO., LTD. (in Japanese)
- 6) Niki Y, Experimental and numerical analysis of unburned ammonia and nitrous oxide emission characteristics in ammonia/diesel dual-fuel engine, International Journal of Engine Research, Vol.24 Issue 9 (2023), pp.4190-4203.
- 7) IPCC, Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, (2014)