

アンモニア混焼による船用ディーゼル 機関からのGHG削減

環境・動力系 仁木 洋一



令和3年(第21回)海上技術安全研究所講演会

目次

1. アンモニア燃料利用概要（背景・課題）

2. アンモニア混焼に関する研究成果

2-1. ポイント

2-2. 事例①：重油焚きの船用中速ディーゼル機関に関し、アンモニアを混焼した際の N_2O と未燃 NH_3 の排出特性

2-3. 事例②： N_2O と未燃 NH_3 の排出特性とその低減方法

目次

1. アンモニア燃料利用概要（背景・課題）

2. アンモニア混焼に関する研究成果

2-1. ポイント

2-2. 事例①：重油焚きの船用中速ディーゼル機関に関し、アンモニアを混焼した際の N_2O と未燃 NH_3 の排出特性

2-3. 事例②： N_2O と未燃 NH_3 の排出特性とその低減方法

アンモニア燃料利用エンジンの開発状況

◆ MAN

- アンモニアを燃料とする大型2stエンジンの開発中、2024年には初号機搭載予定
- AmmoniaMOT、4stアンモニアDFエンジンの開発検討のためのコンソーシアムを開始

<https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>

<https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2021/04/07/industry-consortium-to-develop-medium-speed-ammonia-fuelled-engine>

◆ Wärtsilä

- 試験エンジンにて70%混焼での運転を実施済（2021年7月発表）、2023年にはアンモニア専焼コンセプト

<https://www.wartsila.com/media/news/14-07-2021-wartsila-launches-major-test-programme-towards-carbon-free-solutions-with-hydrogen-and-ammonia-2953362>

◆ EU

- ENGIMMONIA(2021/5-2025/4)というアンモニアエンジン開発プロジェクトを発表、3隻の船、5機の実機エンジンを予定（導入時期は不明）、MAN、C-JOBの他、大学など21団体が参加

<https://cordis.europa.eu/project/id/955413>

◆ 日本郵船・J-ENG・IHI原動機・日本シッパード・NK（グリーンイノベーション基金）

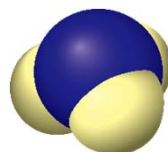
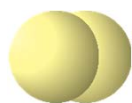
- 主機：4stアンモニア燃料国産エンジン、安全性評価（NK）
- 主機：2stアンモニア燃料国産エンジン、補機：4stアンモニア燃料国産エンジン、安全性評価（NK）

https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000217.html

アンモニア物性値、水素との比較

液化水素

液化アンモニア

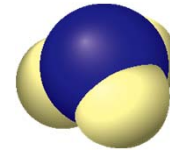


分子式	H ₂	NH ₃
温度 [°C]	-253 (-243)	-33(25)
蒸気圧力 [MPa]	0.1 (1)	0.1(1)
密度 [kg/m ³]	71	602.8
水素密度 [kg-H ₂ /m ³]	71	106

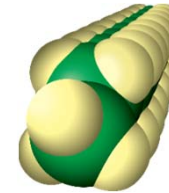
- 燃焼してもCO₂が発生しない。
- 液体水素よりも貯蔵が容易である。
- 大量輸送の方法が確立されている。
- 毒性や腐蝕性がある。

アンモニアの燃焼性

アンモニア



軽油・重油



分子式	NH ₃	Hydro carbons
低位発熱量※ ¹ [GJ/m ³]	11.2	36-39
層流燃焼速度 [m/s]	0.08	0.35-0.40
着火温度 [°C]	651	250-290
引火点[°C]	132	50-70

- 体積当たりの発熱量が小さい、軽油・重油の1/3程度。
- 軽油や重油に比べて燃えにくい。着火・燃焼方式の開発や補助燃料※²による燃焼が必要であり、NH₃が未燃のまま排出される恐れがある。

※¹ ディーゼル機関の性能評価において用いられている。（高位発熱量とは異なる）

※² 本スライドにおける補助燃料とは、NH₃燃焼において着火や燃焼を補助するために利用される軽油や重油を指す。

アンモニアの燃焼生成物 N_2O

- 燃焼生成物として、アンモニア起因の NO_x (NO , NO_2)やGHGである N_2O (亜酸化窒素)を生成する場合がある。(CO_2 の265倍の温室効果¹⁾)

1) Climate Change 2014 Synthesis Report, (2015), Intergovernmental Panel on Climate Change.

- 数百ppmの N_2O であっても、アンモニア混焼による CO_2 削減の効果を、相殺してしまう可能性がある。

アンモニア燃料利用の課題

- ◆ GHGである N_2O の排出に注意し、排出される場合、低減方法が必要である。
- ◆ NH_3 を適切に燃焼し未燃 NH_3 を排出しない。

目次

1.アンモニア燃料利用概要（背景・課題）

2.アンモニア混焼に関する研究成果

2-1. ポイント

2-2. 事例①：重油焚きの船用中速ディーゼル機関に関し、アンモニアを混焼した際の N_2O と未燃 NH_3 の排出特性

2-3. 事例②： N_2O と未燃 NH_3 の排出特性とその低減方法

ポイント

事例①：船用中速ディーゼル機関によるNH₃混焼

N₂Oや未燃NH₃の排出特性が不明であることから、**重油焚きの船用中速ディーゼル機関の給気にNH₃を混ぜて燃焼試験を実施**し、排出特性を調査した。

- その結果、NH₃混焼を行った場合、**N₂O及び未燃NH₃が発生**し、更に、**NH₃混合量の増加に伴い、N₂O及び未燃NH₃の排出が増加**することが判明した。

事例②：N₂Oと未燃NH₃の排出特性とその低減方法

小型試験用ディーゼル機関を用いて、N₂Oと未燃NH₃の排出特性を確認し、N₂O及び未燃NH₃の低減方法を検討した。

- N₂Oや未燃NH₃の排出特性は船用中速ディーゼル機関と同様であった。
- **N₂O及び未燃NH₃を低減するためには、軽油の早期噴射が有効**であることが確認された。

目次

1. アンモニア燃料利用概要（背景・課題）

2. アンモニア混焼に関する研究成果

2-1. ポイント

2-2. 事例①：重油焚きの船用中速ディーゼル機関に関し、アンモニアを混焼した際の N_2O と未燃 NH_3 の排出特性

2-3. 事例②： N_2O と未燃 NH_3 の排出特性とその低減方法

用語について

- CO_2 削減率 = $1 - \frac{\text{NH}_3\text{混焼時の}\text{CO}_2\text{排出率}}{\text{軽油または重油のみ使用時の}\text{CO}_2\text{排出率}}$ 軽油または重油のみ使用時の CO_2 排出率に対する NH_3 混焼によって低減された CO_2 排出率の比率
- NH_3 混焼率 = $\frac{\text{NH}_3\text{の低位発熱量[J]}}{\text{軽油(重油)の低位発熱量[J]} + \text{NH}_3\text{の低位発熱量[J]}}$ 軽油または重油とアンモニアの合計の低位発熱量中、アンモニアからの熱量が占める比率
- NH_3 未燃率 = $\frac{\text{未燃NH}_3\text{の量[l/min]}}{\text{供給したNH}_3\text{の量[l/min]}}$ 排ガス中未燃 NH_3 の供給 NH_3 に対する比率
- GHG 排出率 = $\frac{(\text{CO}_2\text{濃度} + \text{N}_2\text{O濃度} \times \text{N}_2\text{Oの温室効果係数}) \times \text{排ガス量}[\text{m}^3/\text{h}] \times \text{CO}_2\text{密度} [\text{g}/\text{m}^3]}{\text{機関出力}[\text{kW}]}$ 機関出力当たりの GHG 排出量、 GHG は、 N_2O の温室効果を考慮して CO_2 相当に換算し、 CO_2 排出量として算出した。
- GHG 削減率 = $1 - \frac{\text{NH}_3\text{混焼時の}\text{GHG}\text{排出率}}{\text{軽油または重油のみ使用時の}\text{GHG}\text{排出率}}$ 軽油または重油のみ使用時の GHG 排出率に対する NH_3 混焼によって低減された GHG 排出率の比率

船用中速ディーゼル機関※によるNH₃混焼

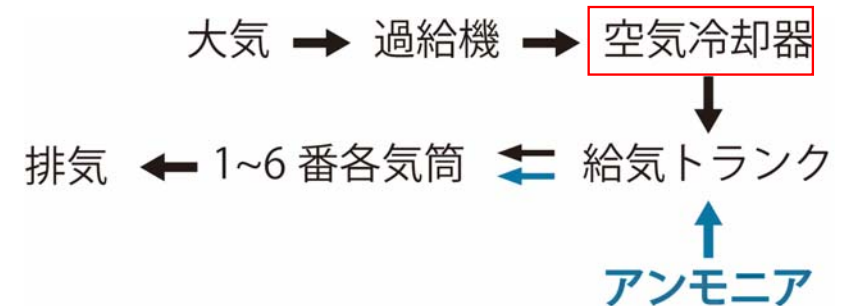
※ アンモニア燃料利用を想定して開発された機関ではなく、既存のディーゼルエンジンをA重油にて運転されている状態に、アンモニアを混合して実験を実施しています。



船用中速ディーゼル機関

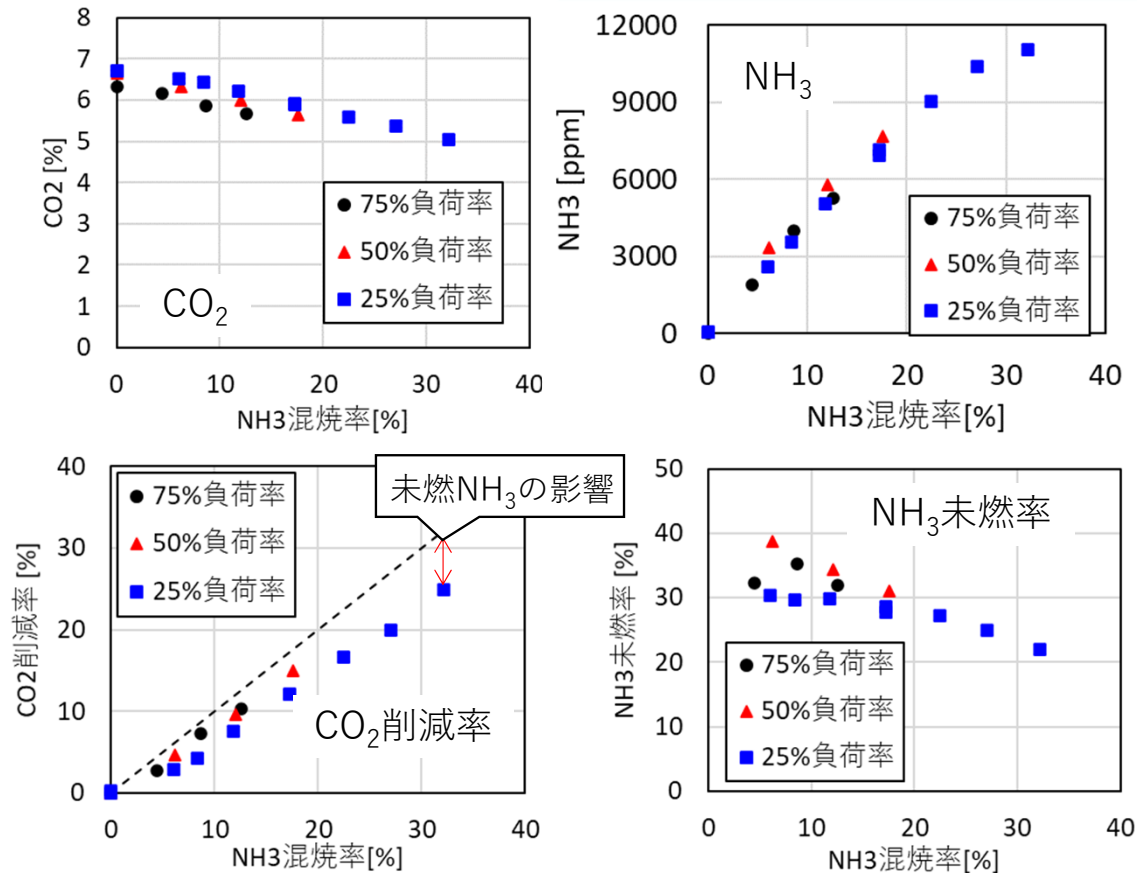
試験機関要目

型式	6L19HX
様式	過給機、空気冷却器付
定格出力	750 kW
定格回転速度	1000 min ⁻¹
ボア×ストローク	190 x 260 mm
燃料噴射システム	機械式



アンモニア供給経路

NH₃混焼が、排ガス性状に与える影響³



NH₃混焼による排ガス成分の変化
(各負荷率にて回転速度・出力一定として測定)

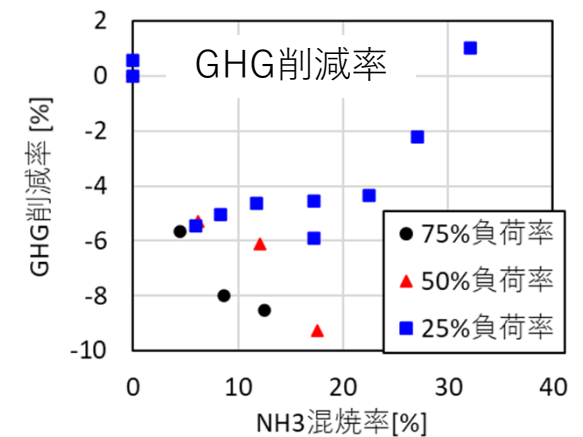
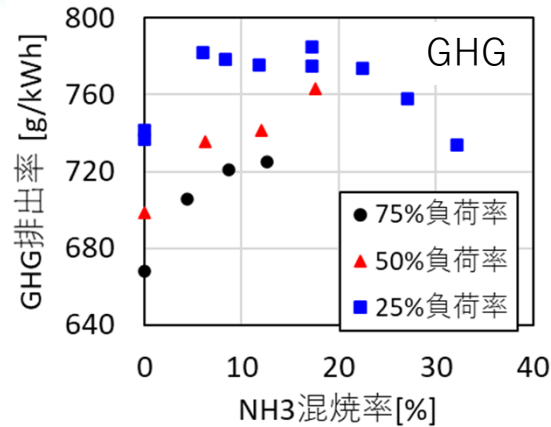
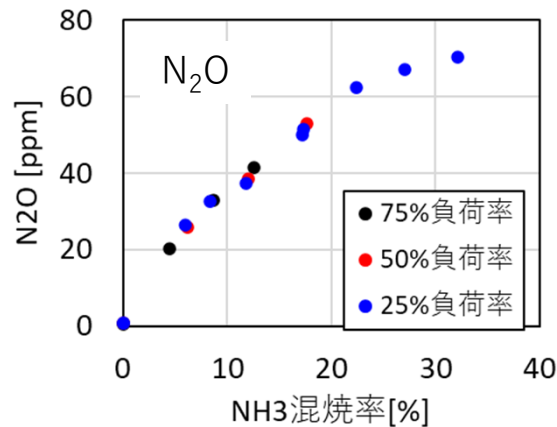
運転条件

負荷率[%]	回転速度[1/min]	出力[kW]
75	909	563
50	794	375
25	630	188

- NH₃の混焼によって、排気中のCO₂濃度は低下し、その削減率は、NH₃混焼率よりやや低いが、NH₃混焼量に比例している。
- NH₃混焼量に比例して、未燃NH₃が排出され、その割合は30%程度であった。給気トラックに供給したため、バルブオーバーラップ時※にNH₃を含む給気が排気側に吹き抜ける分によって、未燃率が増えている。

※ディーゼル機関の作動行程中において、吸気バルブと排気バルブが同時に開いている状態。このとき、給気の一部が燃焼室内を通り排気管側へ吹き抜ける。

NH₃混焼が、排ガス性状に与える影響



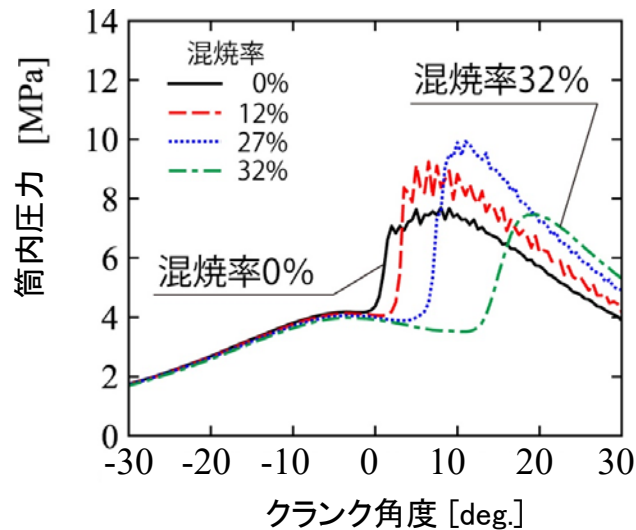
NH₃混焼による排ガス成分の変化 (各負荷率にて回転速度・出力一定として測定)

- NH₃混焼量に比例して、N₂Oの排出濃度も増加傾向にある。NH₃混焼率が高くなると、その増加傾向は弱まるため、GHG削減効果が僅かに得られている。
- N₂Oの排出量は、GHG削減率を大きく下げてしまう。

◆ N₂Oや未燃NH₃排出量の低減方法が必要

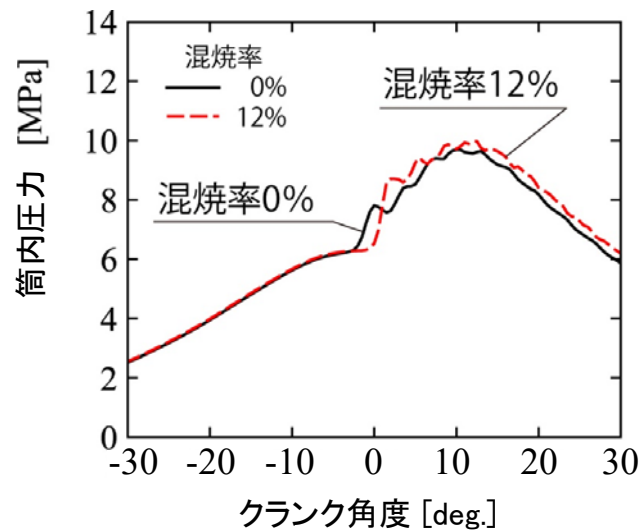
◆ 今回使用したエンジンは、アンモニア燃料を想定して開発されたエンジンではないことにご留意下さい。

NH₃混焼が、燃焼状態に与える影響



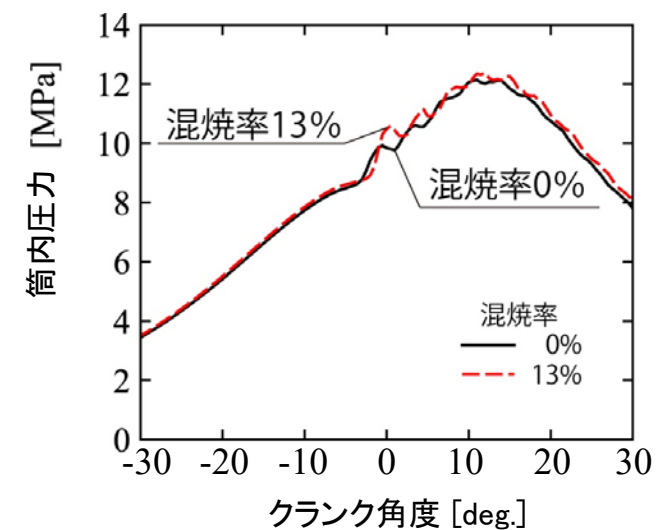
25%負荷率

(回転速度:630 min⁻¹、出力:188 kW)



50%負荷率

(回転速度:794 min⁻¹、出力:375 kW)



75%負荷率

(回転速度:909 min⁻¹、出力:563 kW)

- アンモニアの混焼によって、着火時間の遅れと筒内圧力の増加が見られる。
- 同程度の混焼率の場合、アンモニア混焼による燃焼状態への影響は低負荷の方が大きい。

船用中速ディーゼル機関によるNH₃混焼まとめ

- NH₃混焼によって、排気中のCO₂濃度は低下するがGHGであるN₂O及び未燃NH₃の排出がある。
 - N₂Oは、NH₃供給量と共に増加するが、NH₃混焼率が高くなるとその増加傾向が弱まる。
 - アンモニアの混焼によって、着火時間（圧力の急上昇）の遅れが見られた。
 - 同程度の混焼率の場合、アンモニア混焼による燃焼状態への影響は低負荷の方が大きい。
- ◆ 今回使用したエンジンは、アンモニア燃料を想定して開発されたエンジンではないことにご留意下さい。

目次

1.アンモニア燃料利用概要（背景・課題）

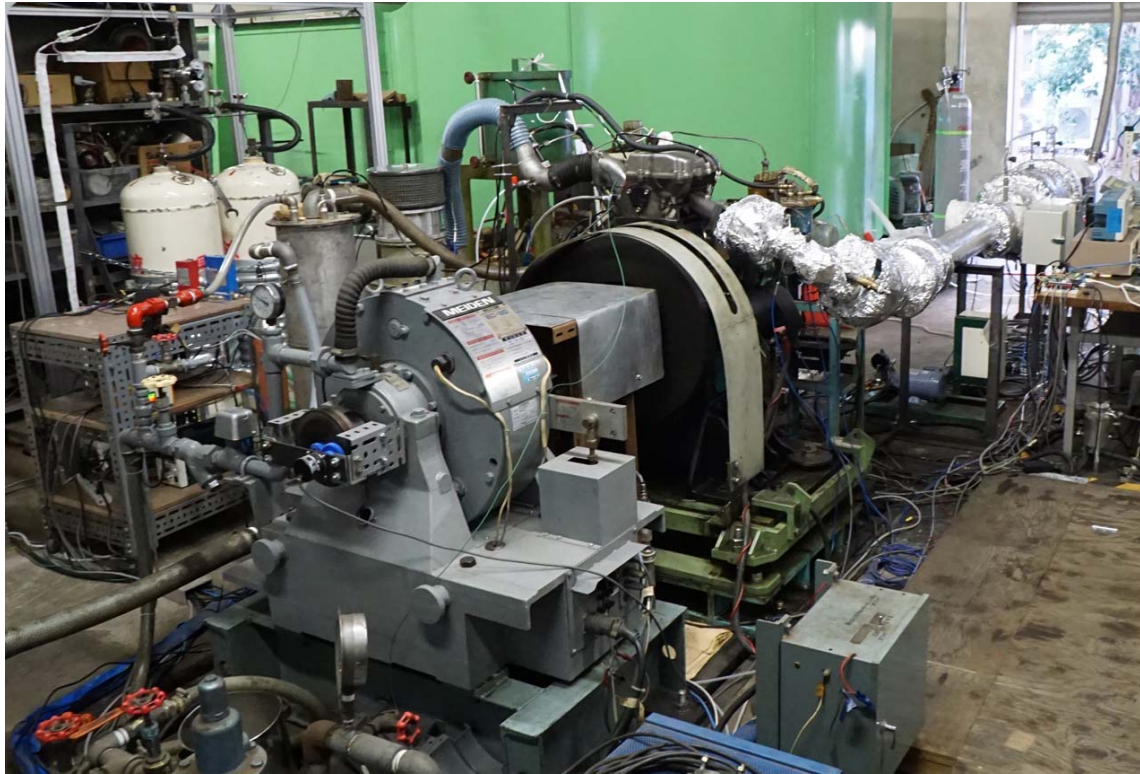
2.アンモニア混焼に関する研究成果

2-1. ポイント

2-2. 事例①：重油焚きの船用中速ディーゼル機関に関し、アンモニアを混焼した際の N_2O と未燃 NH_3 の排出特性

2-3. 事例②： N_2O と未燃 NH_3 の排出特性とその低減方法

小型試験用ディーゼル機関によるNH₃混焼



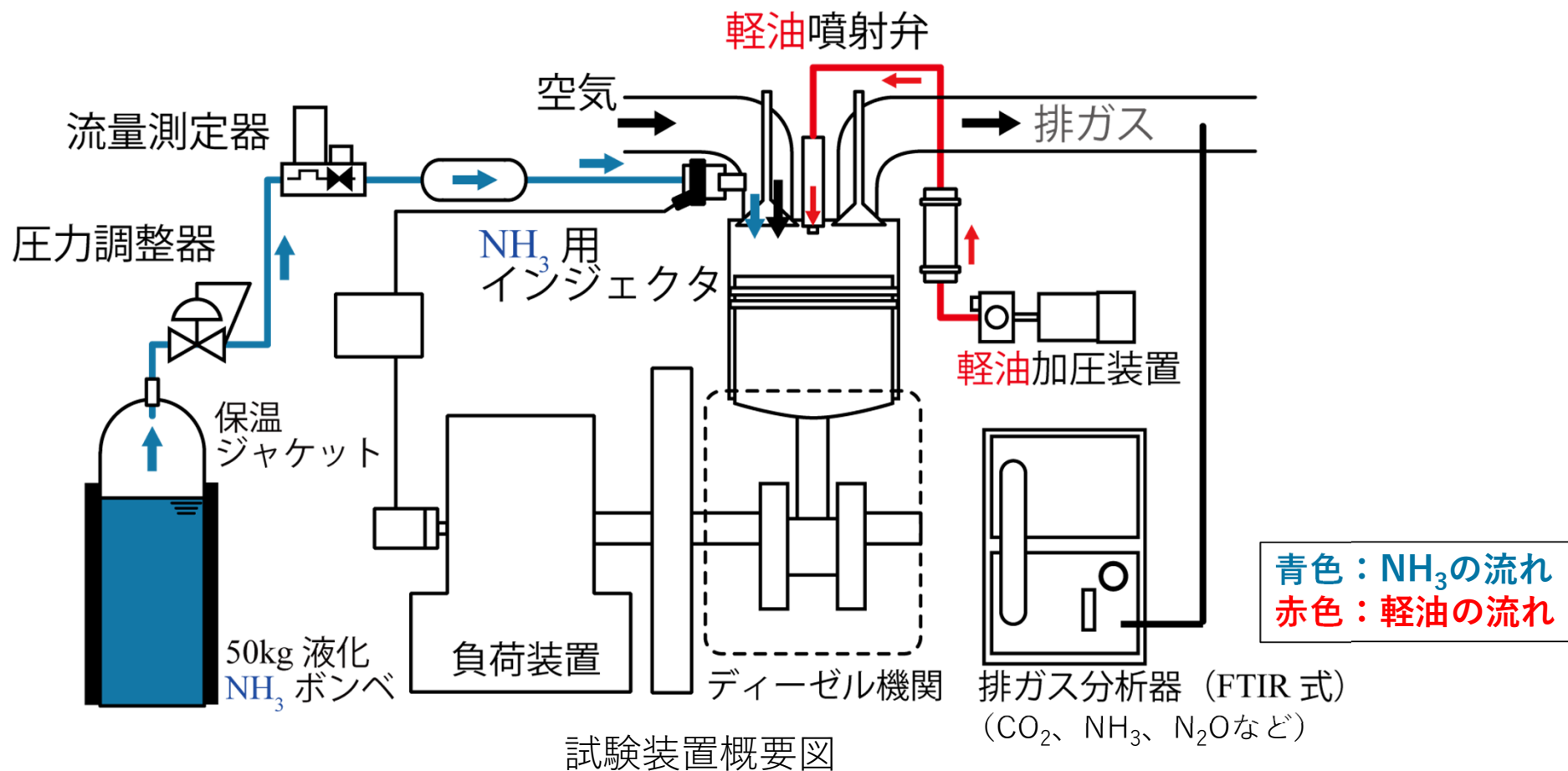
小型試験用中速ディーゼル機関

試験機関要目

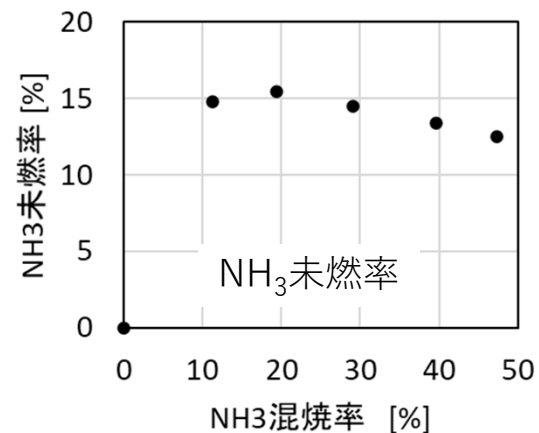
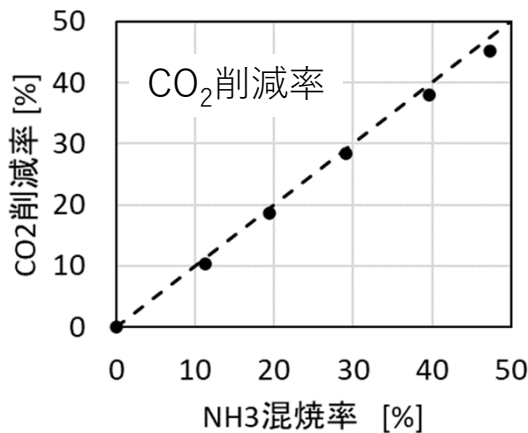
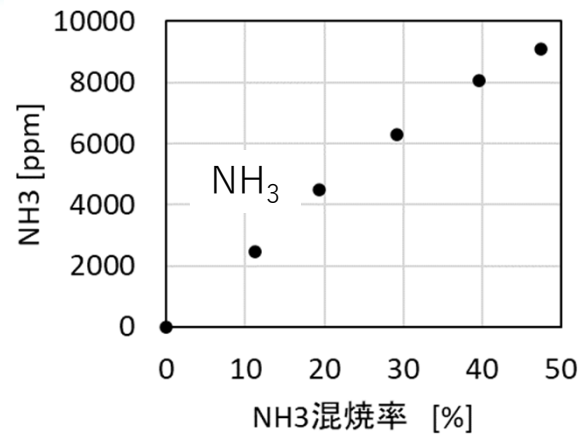
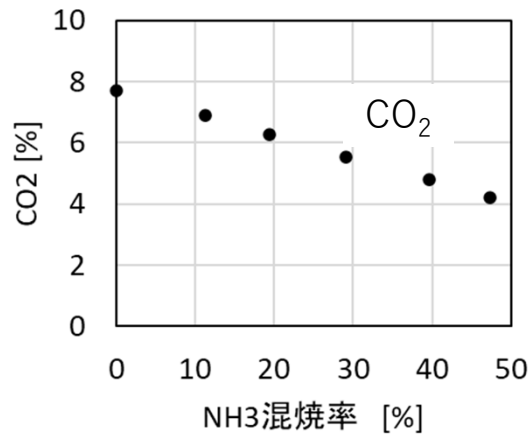
型式	AVLベース
様式	自然吸気
定格出力	7.7 kW
定格回転速度	1500 min ⁻¹
ボア×ストローク	112 x 100 mm
燃料噴射システム	コモンレール・電子制御

- 燃料噴射システムにコモンレールと電子制御噴射弁を用いておりますので、噴射時期を変更した詳細な試験が可能です。

試験装置概要



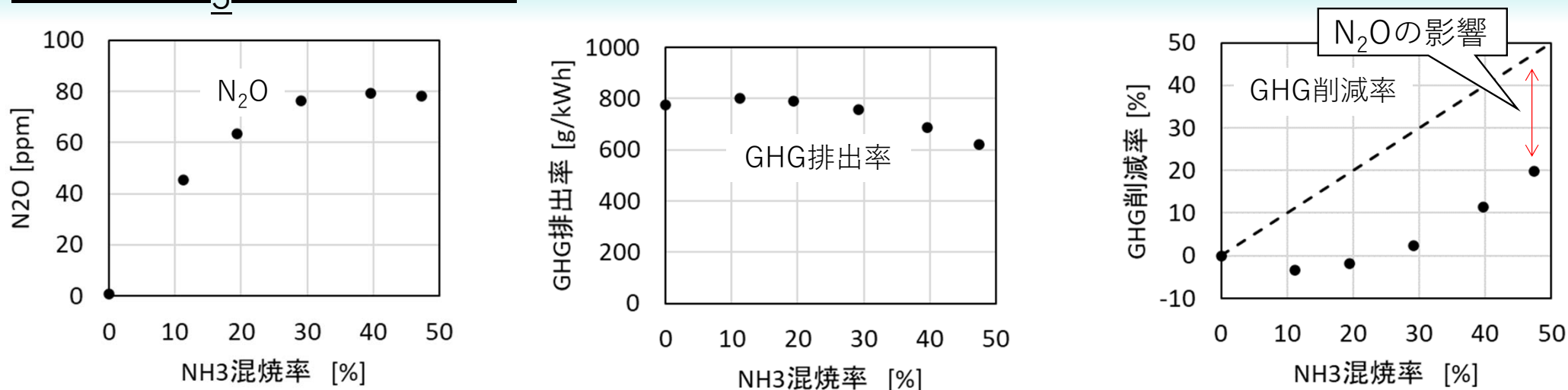
(軽油の早期噴射を行わない場合) 小型試験用ディーゼル機関でのNH₃混焼結果①



- 船用中速ディーゼル機関の結果と同様に、NH₃混焼率に比例してCO₂は低下し、未燃NH₃は増加している。
- NH₃未燃率は、混焼量によらず15%程度であった。

NH₃混焼による排ガス成分の変化 (回転速度:1500 min⁻¹、出力:7.7 kW一定)

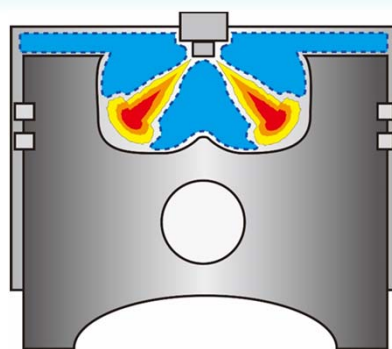
（軽油の早期噴射を行わない場合）小型試験用ディーゼル機関でのNH₃混焼結果②



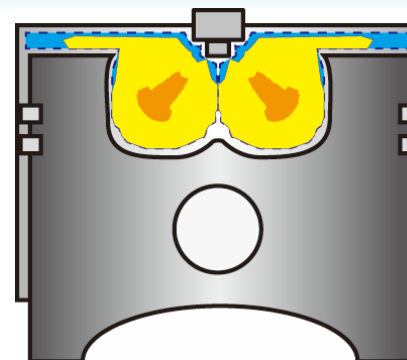
NH₃混焼による排ガス成分とGHG排出率の変化（回転速度:1500 min⁻¹、出力:7.7 kW一定）

- N₂Oの排出特性についても、船用中速ディーゼル機関の場合と同じ傾向であった。
- 機関の大きさや、燃焼時の圧力温度、過給の有無といった点で船用機関とは異なるが、N₂Oや未燃NH₃の排出特性に関しては同様の傾向が見られ、後述するN₂Oと未燃NH₃低減手法が、船用中速ディーゼル機関にも適用できると考えられる。

N_2O と未燃 NH_3 の低減手法



通常噴射時

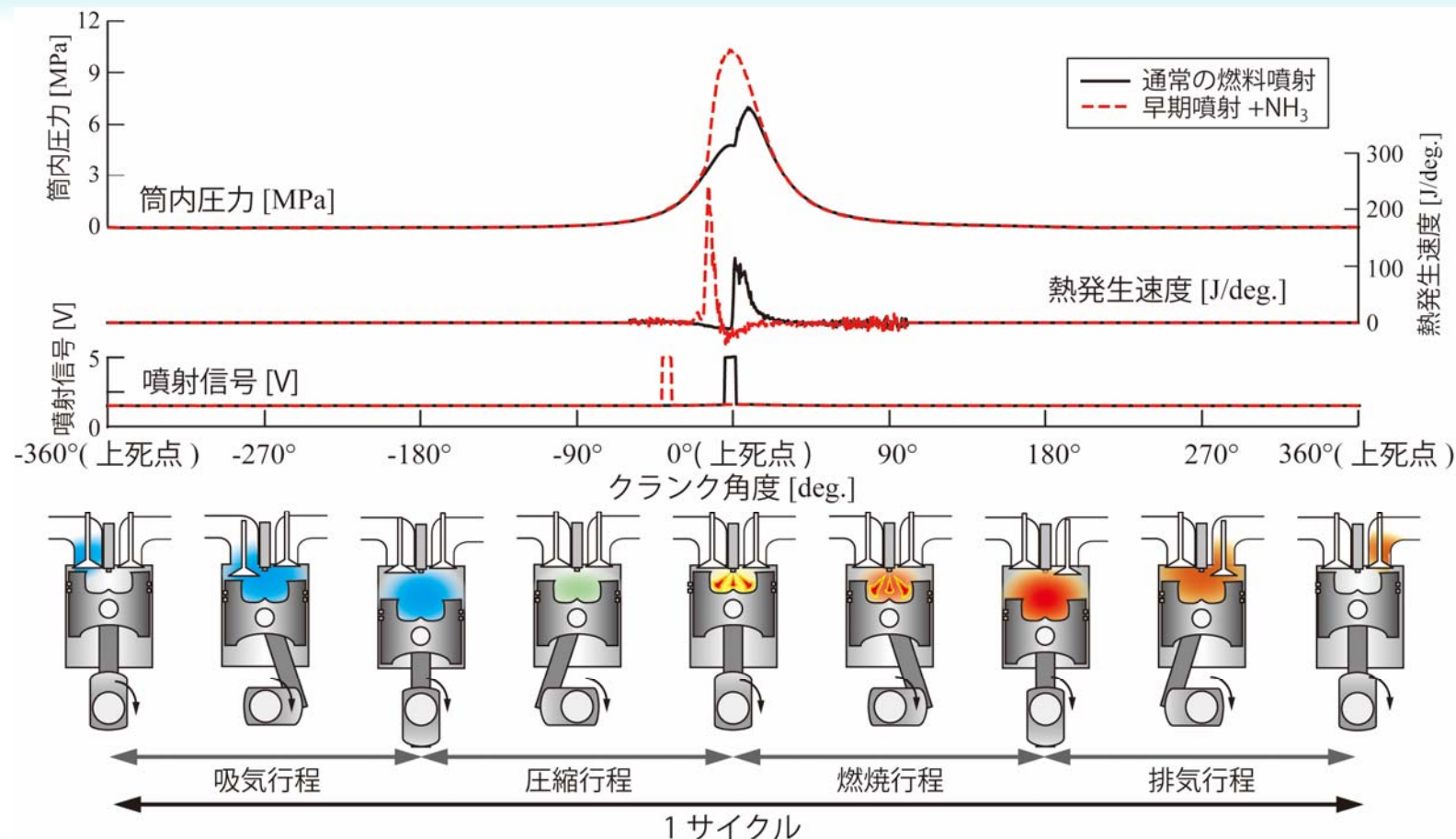


噴射時期早期化

燃焼室内イメージ

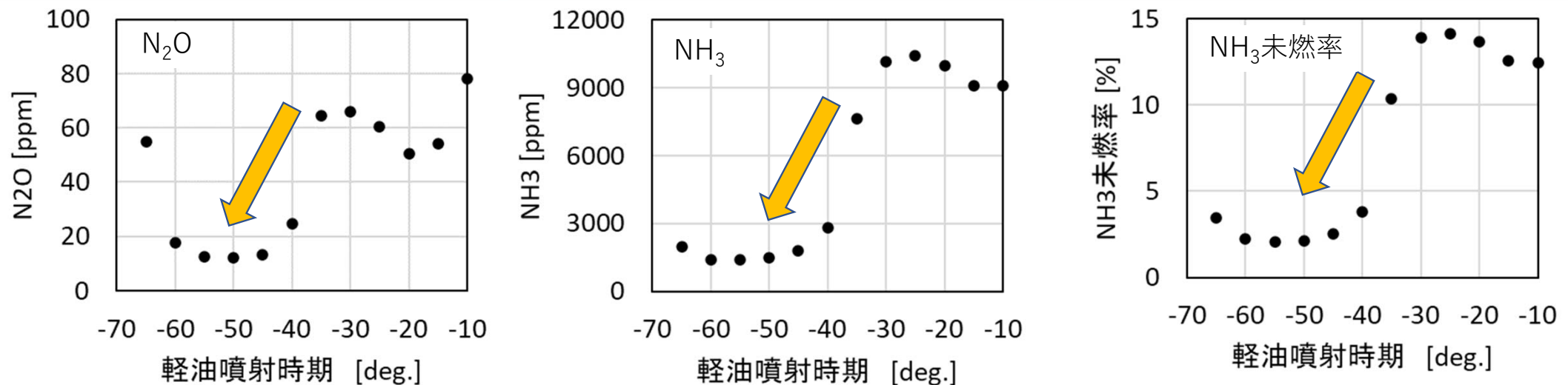
- NH_3 の分解過程で発生した N_2O や NH_3 は、機関の燃焼室内において、局所的な低温部分（図中青色）に存在すると考えられる。そこで、軽油または重油を、燃焼室内により分散させることにより、局所的な低温部分を低減させて、排出量の削減を試みました。
- 軽油または重油を、燃焼室内により分散させるために噴射時期の早期化を行った。

噴射時期の早期化について



軽油噴射時期の早期化

噴射時期が排ガス成分に及ぼす影響(45%混焼)

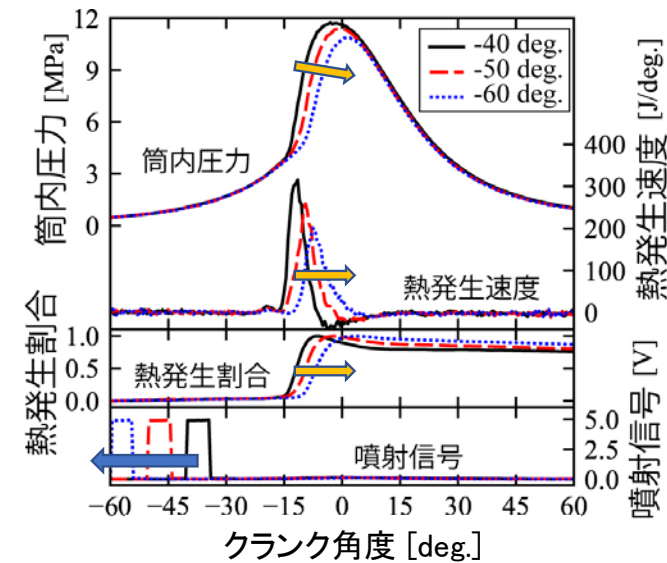
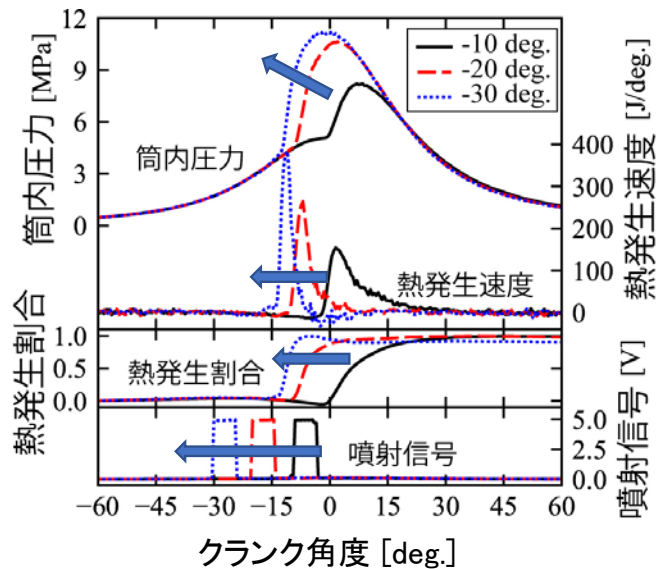


噴射時期の早期化による未燃NH₃とN₂Oの低減効果
(回転速度:1500 min⁻¹、出力:6.3~7.8 kW、軽油噴射量:24 mg、NH₃混焼率:45%)

- **軽油の噴射時期を早めた場合 (-30~-50 deg.の時)、N₂Oと未燃NH₃の減少が見られる。**
- この**N₂Oと未燃NH₃の減少**と同時に、燃焼状態の変化も確認している。

噴射時期が燃焼状態に及ぼす影響(45%混焼)

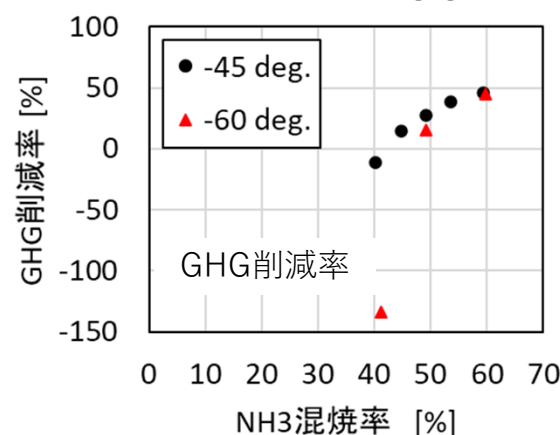
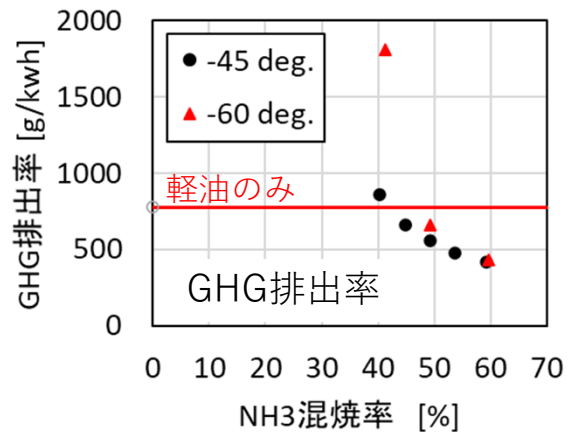
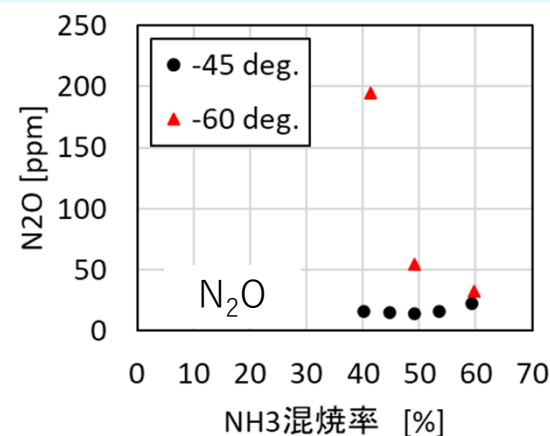
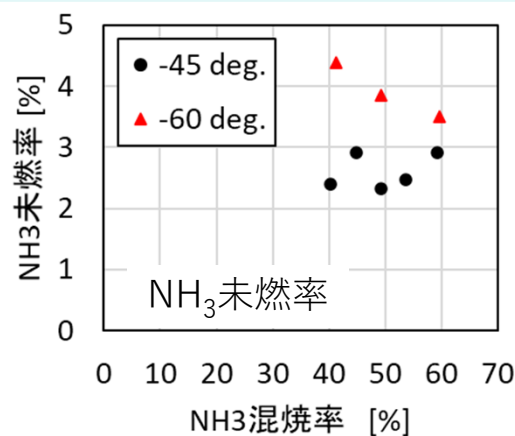
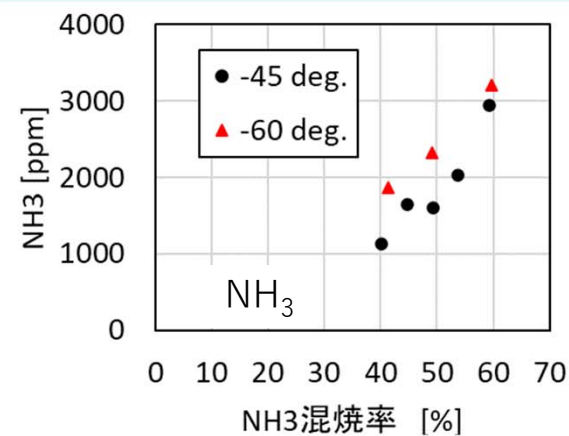
◆ N_2O 及び未燃 NH_3 を大きく削減できる噴射時期(-40deg.以降)において、燃焼状態も変化している。



噴射時期の早期化による筒内圧力及び熱発生率の変化
(回転速度:1500 min⁻¹、出力:6.3~7.8 kW、軽油噴射量:24 mg、 NH_3 混焼率:45%)

- 軽油の噴射時期を早めると、噴射時期と共に燃焼開始が早まり、燃焼期間短くなる。噴射時期が、-40deg.以降は、この傾向が逆になる。
- 燃焼室内に、軽油がより分布することで、燃焼状態の変化に違いが表れたと考えられる。

噴射時期の早期化と運転条件の調整によるGHG削減



- N₂Oと未燃NH₃を低減できている。
- 運転条件の調整によって、NH₃混焼率60%、GHG削減率46%を達成している。

噴射時期の早期化と運転条件調整による排ガス性分とGHG排出率の変化
(回転速度:1500 min⁻¹、出力:3.7~7.8 kW、軽油噴射量:21 mg)

ポイント (P.9 再掲)

事例①：船用中速ディーゼル機関によるNH₃混焼

N₂Oや未燃NH₃の排出特性が不明であることから、**重油焚きの船用中速ディーゼル機関の給気にNH₃を混ぜて燃焼試験を実施**し、排出特性を調査した。

- その結果、NH₃混焼を行った場合、**N₂O及び未燃NH₃が発生**し、更に、**NH₃混合量の増加に伴い、N₂O及び未燃NH₃の排出が増加**することが判明した。

事例②：N₂Oと未燃NH₃の排出特性とその低減方法

小型試験用ディーゼル機関を用いて、N₂Oと未燃NH₃の排出特性を確認し、N₂O及び未燃NH₃の低減方法を検討した。

- N₂Oや未燃NH₃の排出特性は船用中速ディーゼル機関と同様であった。
- **N₂O及び未燃NH₃を低減するためには、軽油の早期噴射が有効**であることが確認された。

ご清聴ありがとうございました。

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。また、一部は、JSPS科研費20K04946の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。



令和3年(第21回)海上技術安全研究所講演会

