

2025年度 JPECフォーラム

【16】将来ディーゼルエンジンを想定した
合成燃料利用技術の研究開発

2025年5月13日

北海道大学(柴田 元)

1. はじめに

- 研究背景および研究目的
- JPECのNEDO液体合成燃料(e-fuel)研究
- 研究方法

2. GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

3. OME_{mix}の評価

- ポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME_{mix})の紹介と実験燃料の性能
- OME_{mix}の燃焼評価: エンジン試験(熱効率関連因子、排出ガス特性)
- OME_{mix}の燃焼評価: 急速圧縮膨張装置による試験(OHラジカルのシリンダ内分布画像)

4. 分画燃料の評価

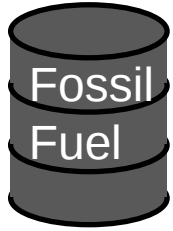
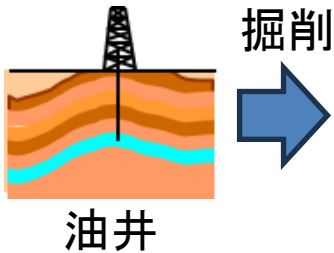
- エンジン試験: 熱効率関連因子と排出ガス性能
- エンジンおよび急速圧縮膨張装置による試験: Heavy-cut GTLの性能評価

5. JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証

6. まとめ

研究背景

<従来の製造>



<カーボンニュートラル燃料製造>



Direct Air Capture (DAC)
<https://www.science.org/content/article/cost-plunges-capturing-carbon-dioxide-air>



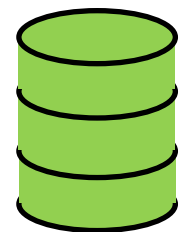
CO₂
H₂O (water)



電解処理

CO
H₂

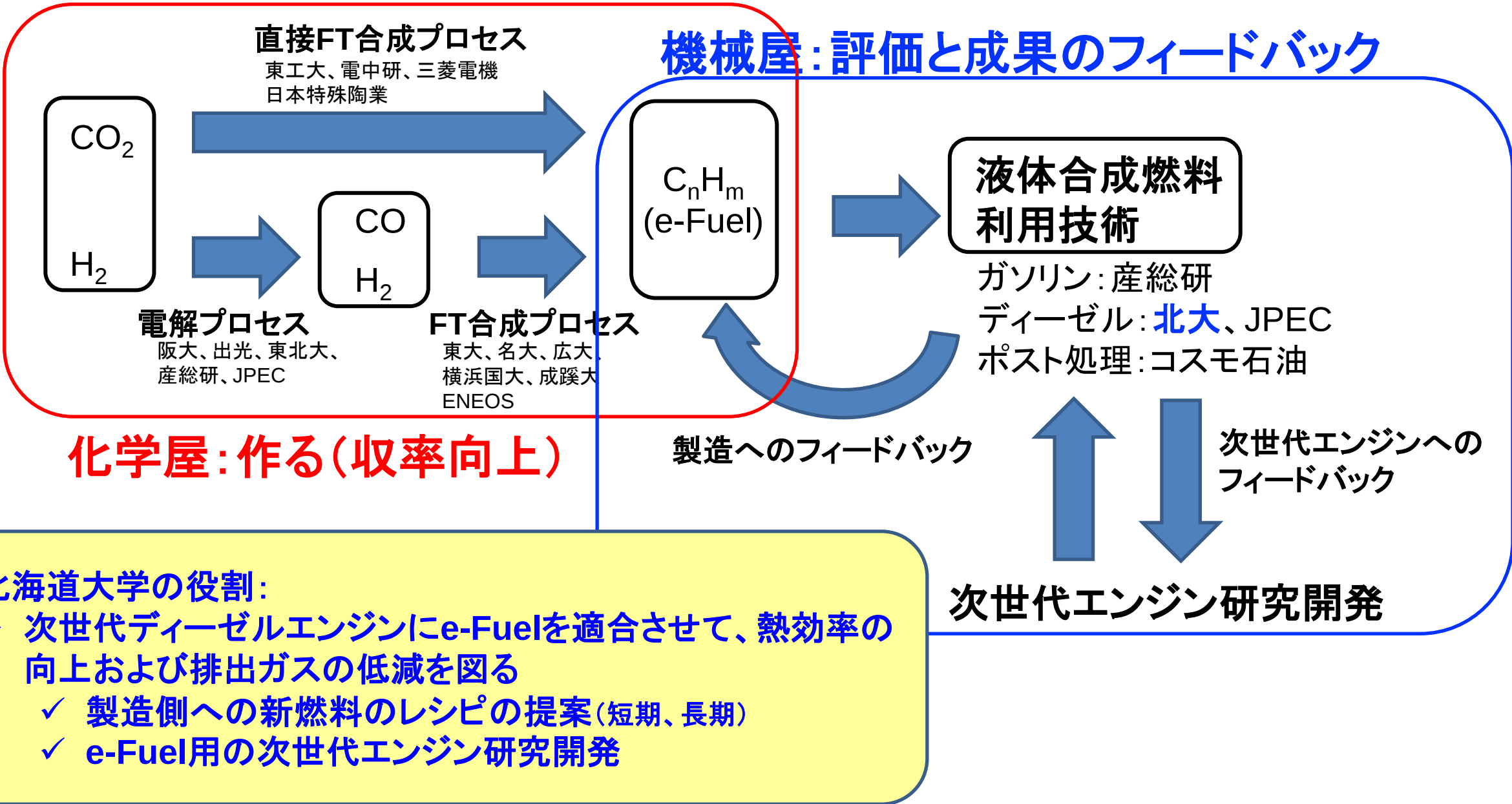
FT合成



CN燃料 (e-fuel)

研究目的

単に軽油代替の液体合成燃料を製造・市場導入するのではなく、現行ディーゼルエンジンの熱効率を改善し排出ガス低減を図ることが可能な液体合成燃料の燃料性状の提案を目的とする。



エンジン実験(間接的)

エンジンにセンサー類を取り付けて
その信号から性能を判断する



- ・血圧計測
- ・聴診
- ・心電図
- ・血液検査
- ・尿検査



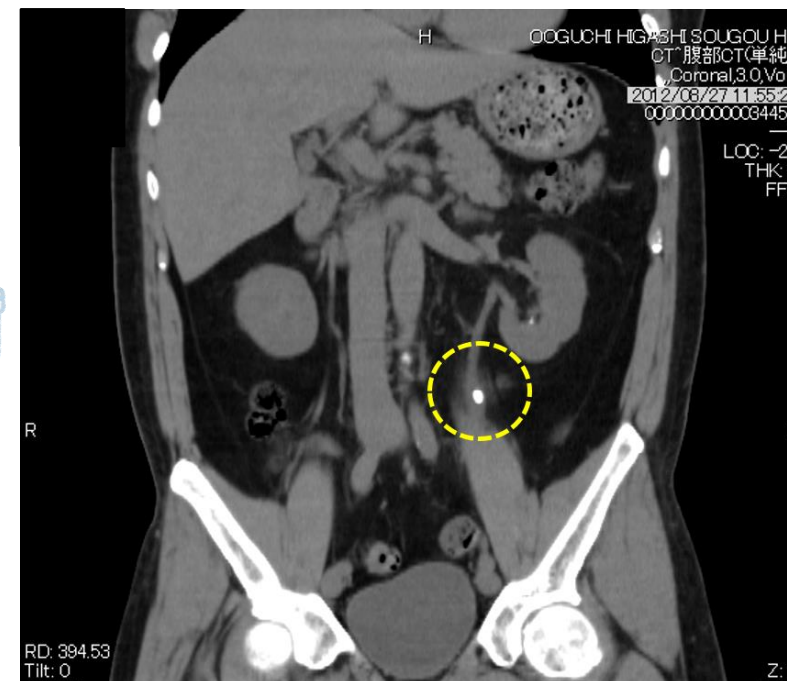
心電図

急速圧縮膨張装置実験(直接的)

エンジンの燃焼室を可視化して、燃
焼の進行を画像で診断する



- ・CTスキャン
- ・MRI診断
- ・レントゲン



CTスキャン画像

1. はじめに

- 研究背景および研究目的
- JPECのNEDO液体合成燃料(e-fuel)研究
- 研究方法

2. GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

3. OME_{mix}の評価

- ポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME_{mix})の紹介と実験燃料の性能
- OME_{mix}の燃焼評価: エンジン試験(熱効率関連因子、排出ガス特性)
- OME_{mix}の燃焼評価: 急速圧縮膨張装置による試験(OHラジカルのシリンダ内分布画像)

4. 分画燃料の評価

- エンジン試験: 熱効率関連因子と排出ガス性能
- エンジンおよび急速圧縮膨張装置による試験: Heavy-cut GTLの性能評価

5. JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証

6. まとめ

GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

ディーゼルエンジン諸元)

Number of cylinders	1
Bore x Stroke	ϕ 87 mm x 110 mm
Displacement	654 cm ³
Compression ratio	16.8
Fuel injection system	Common rail
EGR system	Low pressure
Boosting	Roots blower

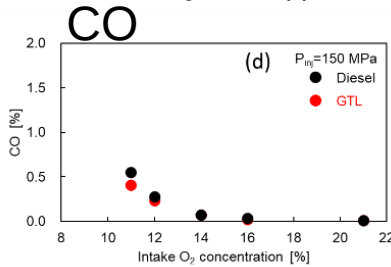
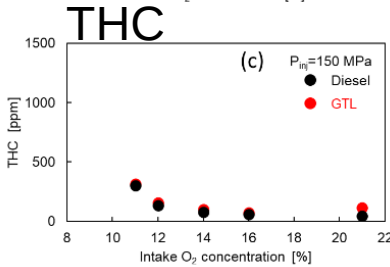
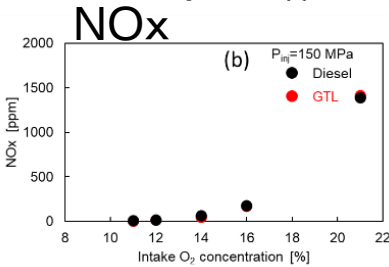
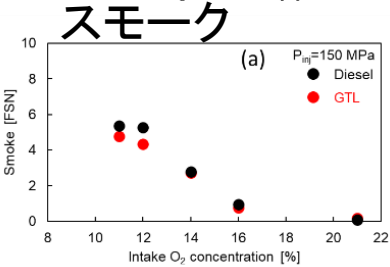
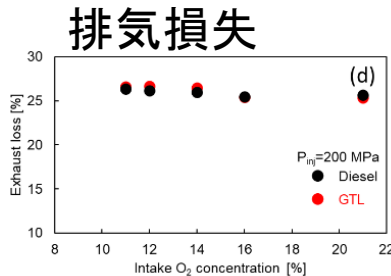
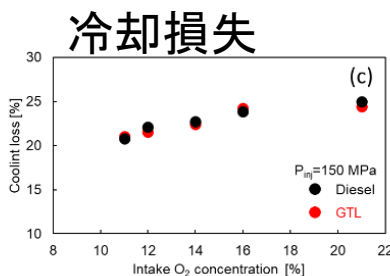
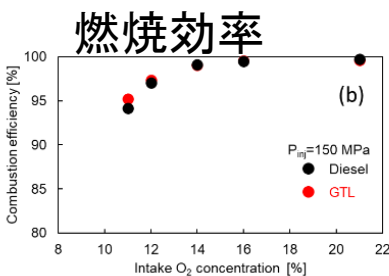
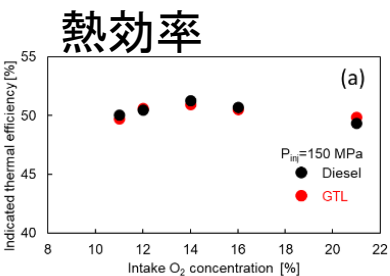
使用した燃料の性状

Test fuel	Diesel	GTL
Cetane number	59.7	68.4
Density g/cm ³	0.826	0.779
Heating value kJ/kg	43330	44080
Paraffins vol%	81.5	99.7
Aromatics	18.5	0.3
Distillation °C		
IBP	172	208.5
10%	217	229
50%	283	264
90%	335.5	312.5
EP	361.5	327

熱効率関連因子と排気エミッションに関して、GTLは軽油と遜色のない性能

エンジン試験条件

Fuel		Diesel、GTL
Engine speed	rpm	1600
IMEP	MPa	0.6
Intake oxygen concentration	vol. %	21-10
Injection pressure	MPa	150MPa
Pilot injection	Timing	CA ATDC -19.8
	Quantity	mm ³ /cycle 1.8
pre injection	Timing	CA ATDC -9.8
	Quantity	mm ³ /cycle 2
Main injection	Timing	CA ATDC -1.8
	Quantity	mm ³ /cycle adjusted to load
Boost pressure	kPa	120 (0.6MPa)
Intake temperature	°C	30
Cooling water temperature	°C	80



1. はじめに

- 研究背景および研究目的
- JPECのNEDO液体合成燃料(e-fuel)研究
- 研究方法

2. GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

3. OME_{mix}の評価

- ポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME_{mix})の紹介と実験燃料の性能
- OME_{mix}の燃焼評価: エンジン試験(熱効率関連因子、排出ガス特性)
- OME_{mix}の燃焼評価: 急速圧縮膨張装置による試験(OHラジカルのシリンダ内分布画像)

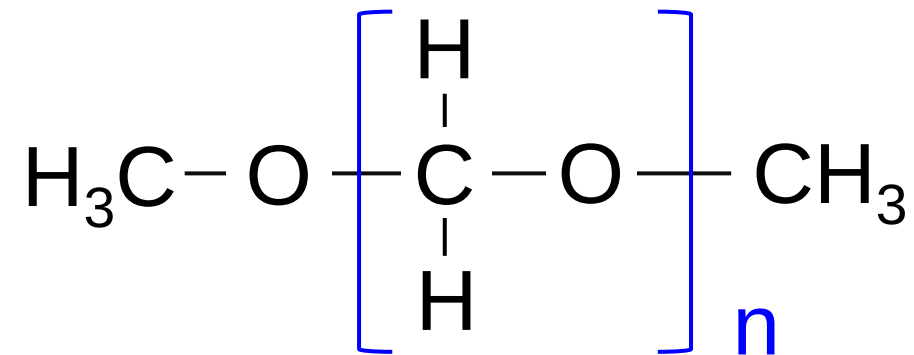
4. 分画燃料の評価

- エンジン試験: 熱効率関連因子と排出ガス性能
- エンジンおよび急速圧縮膨張装置による試験: Heavy-cut GTLの性能評価

5. JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証

6. まとめ

ポリオキシメチレンジメチルエーテル (OME_{mix})の紹介と実験燃料の性状



OME_{mix} はOME3, 4, 5の混合物

- 60% of OME₃ (n=3)
- 30% of OME₄ (n=4)
- 10% of OME₅ (n=5)

OME_{mix}の特徴

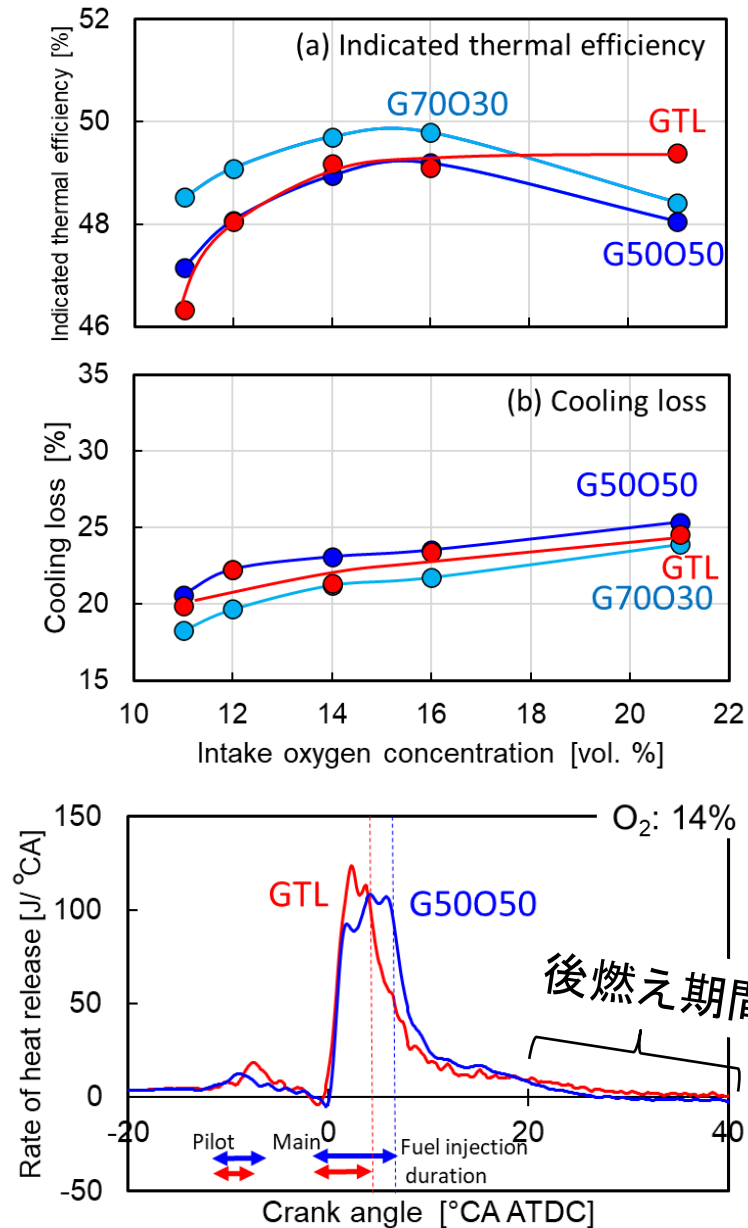
- 炭素間の結合が無いため、燃焼時のスモーク生成が少ないことが報告されている
- OME_{mix}の低位発熱量はGTLの44.5%しかない

G70O30: GTL70%+OME_{mix}30%

G50O50: GTL50%+OME_{mix}50%

実験燃料の性状

Fuels		GTL	OME _{mix}	G70O30	G50O50
Cetane number		66.2	57.3	72.2	71
Cetane index		82.3	0.7	37.2	24.5
Density [g/cm ³]		0.779	1.055	0.8553	0.9105
Lower heating value [MJ/kg]		43.51	19.37	34.83	29.60
Distillation [°C]	IBP	210.5	145.5	156.5	153.0
	T10	227.0	160.5	172.5	167.0
	T30	244.0	165.5	197.0	177.5
	T50	262.5	171.0	235.5	202.0
	T70	285.0	184.0	270.5	242.0
	T90	310.0	210.5	305.0	298.0
	EP	324.5	244.5	323.0	319.0
Oxygen concentration [wt%]		<0.1	46.1	17.1	26.9
Viscosity [mm ² /s]		3.230	1.223	2.008	1.700



既存のエンジンにOME_{mix}燃料を使用した例

- OME_{mix}を30%混合すると熱効率が向上する
- OME_{mix}を50%混合すると冷却損失が増加し熱効率は低下する



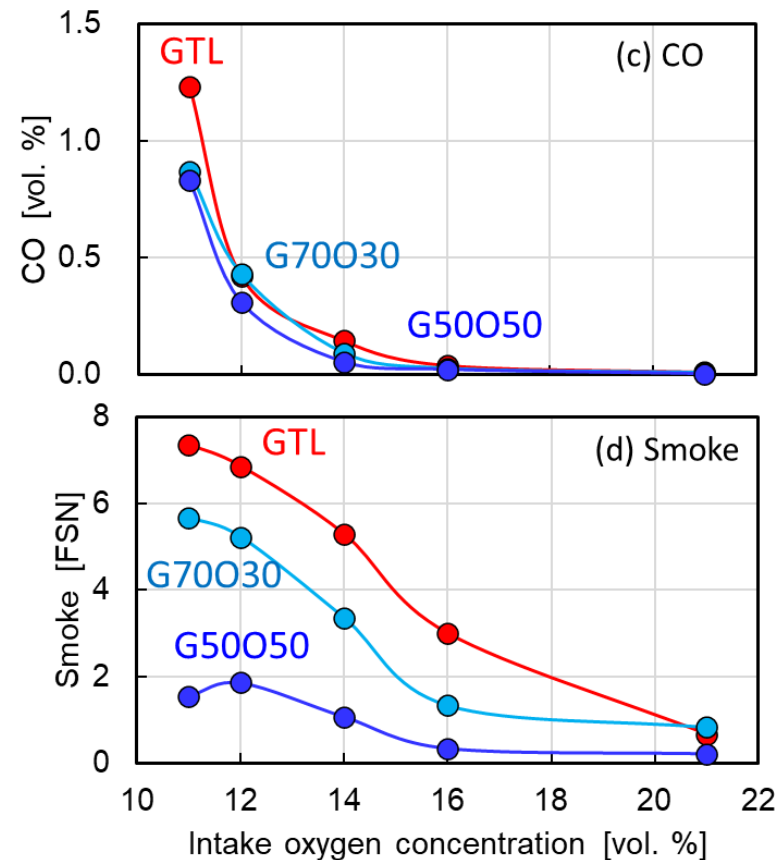
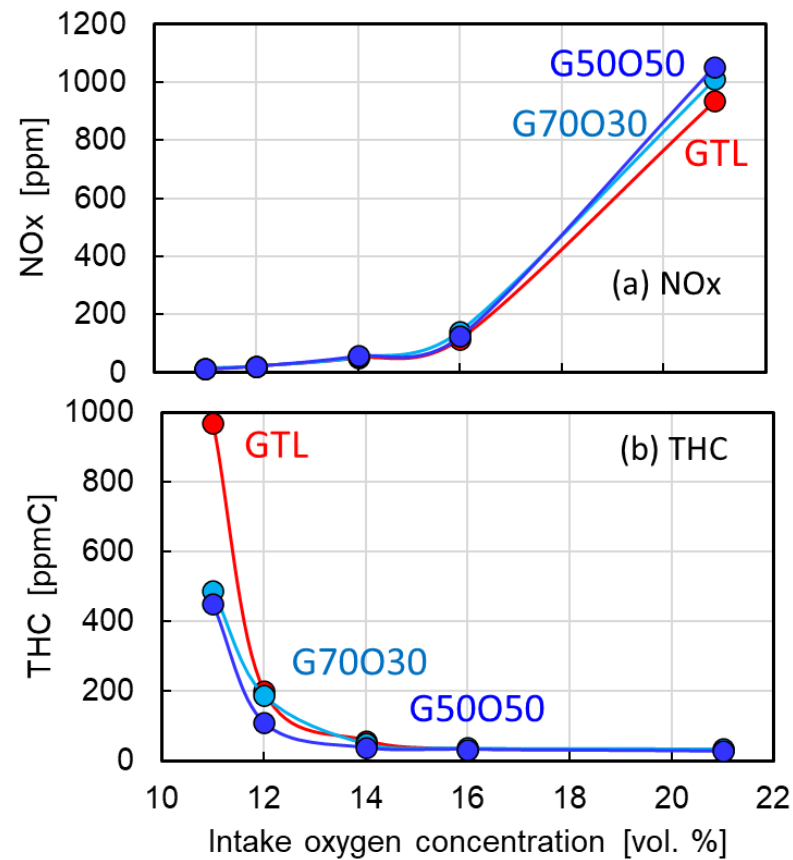
OME_{mix}30%程度までは多少燃焼期間が伸びても熱効率は向上するが、多量に混合すると燃焼期間の伸長して冷却損失を増え熱効率が低下する

(混合量を増やす場合はインジェクターの適合*が必要)

*噴孔径の拡大、多噴孔化、高噴射圧など

- OME_{mix}混合燃料は噴射終了と同時に熱発生率が急峻に立ち下がる
- OME_{mix}混合燃料には後燃え期間の短縮効果がある

OME_{mix}の燃焼評価： エンジン試験 排出ガス性能



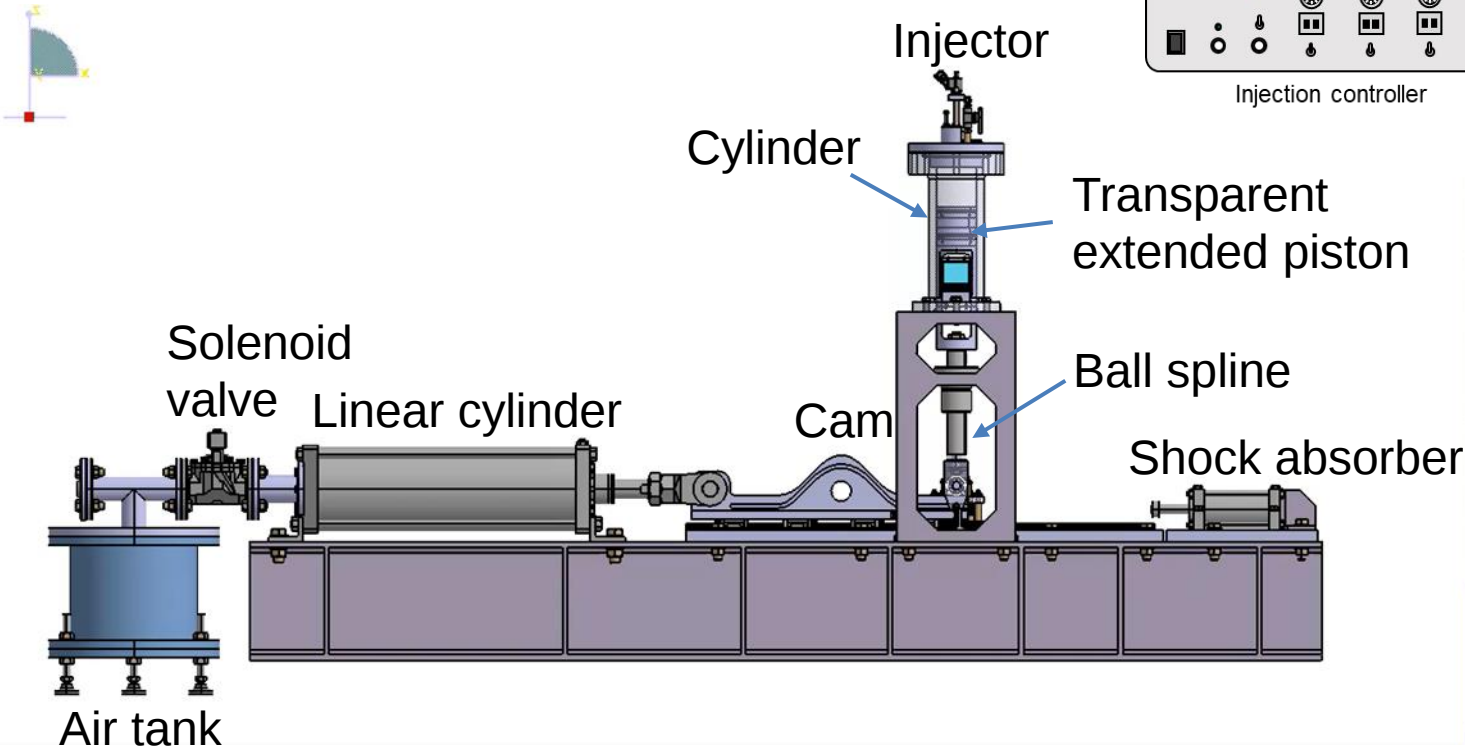
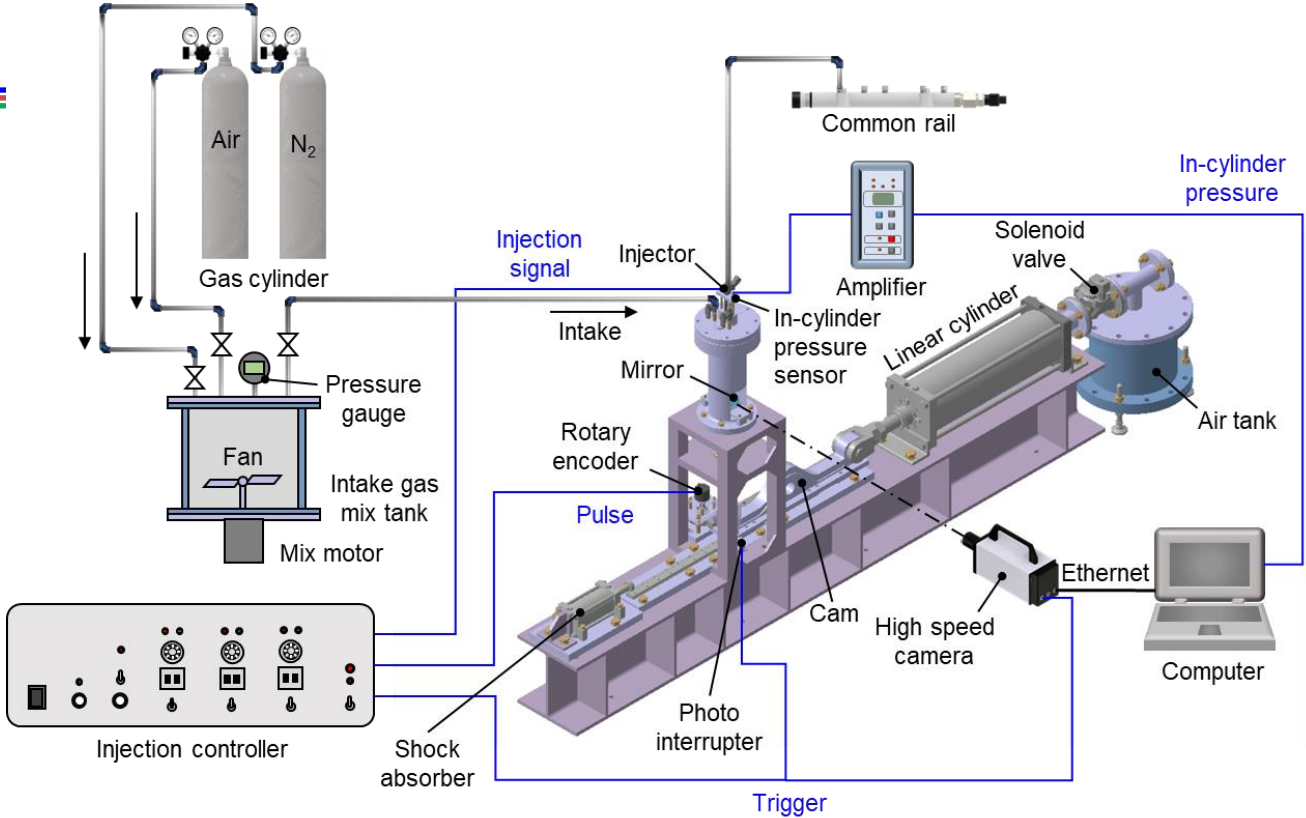
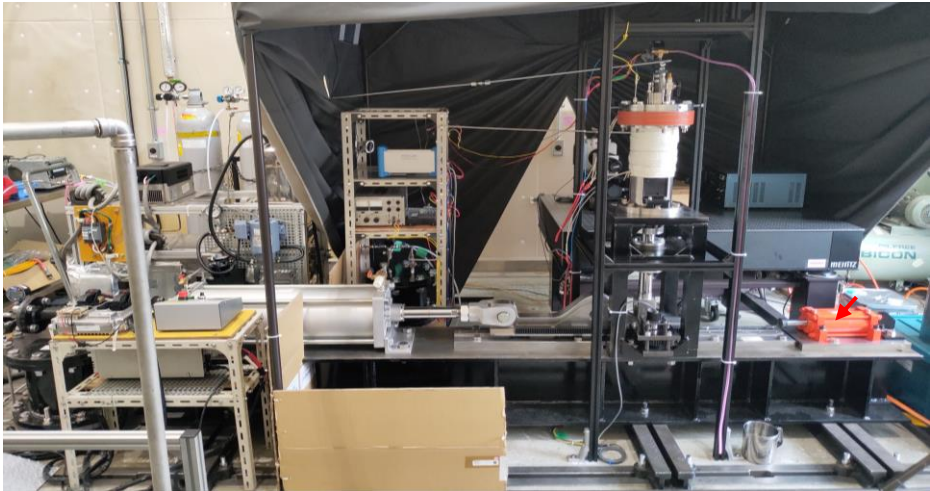
OME_{mix}には

- CO, THCの排出を低減させる効果
- 特にスモーク排出低減に効果的

OME_{mix}を上手に使いこなせば、熱効率の向上とスモークの大幅削減が図れる

急速圧縮膨張装置(RCEM*)の紹介

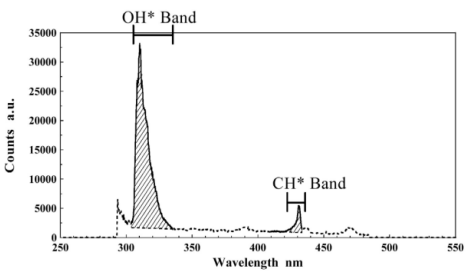
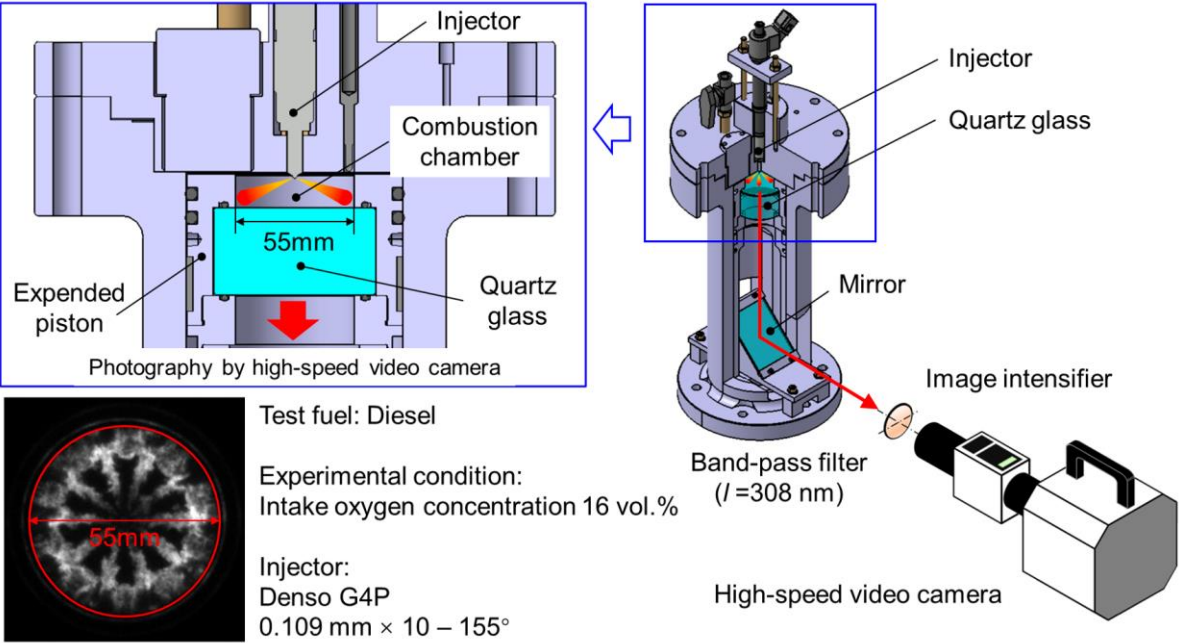
*Rapid compression and expansion machine



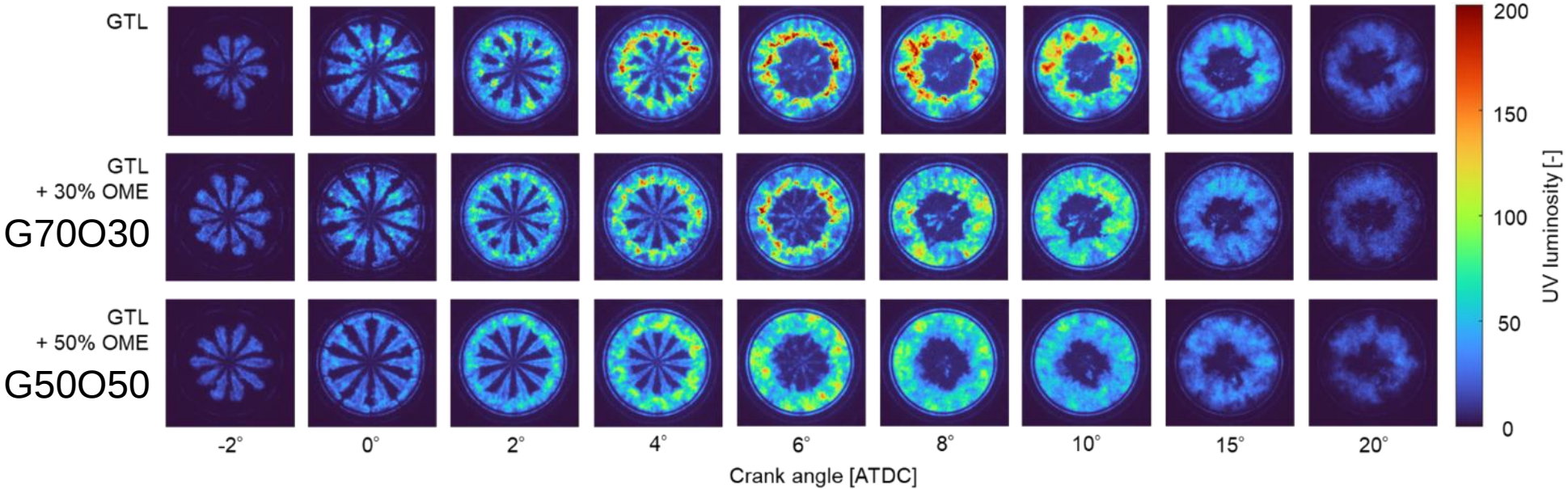
RCEM諸元

Bore × Stroke	$\phi 100 \times 100 \text{ mm}$
Displacement	785 cm^3
Compression ratio	16.7
Nozzle hole	$\phi 0.109 \text{ mm} \times 10\text{-}155^\circ$
Combustion cavity shape	Cylindrical $\phi 55 \times 15 \text{ mm}$

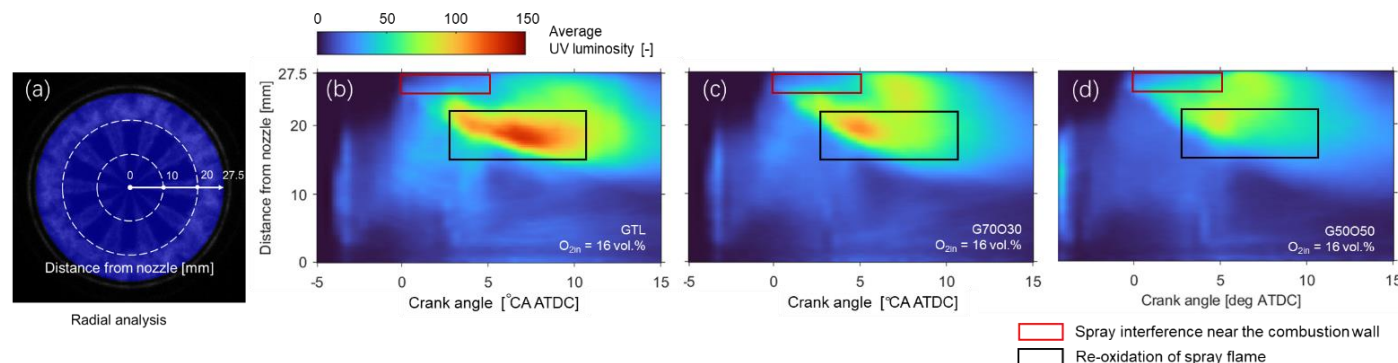
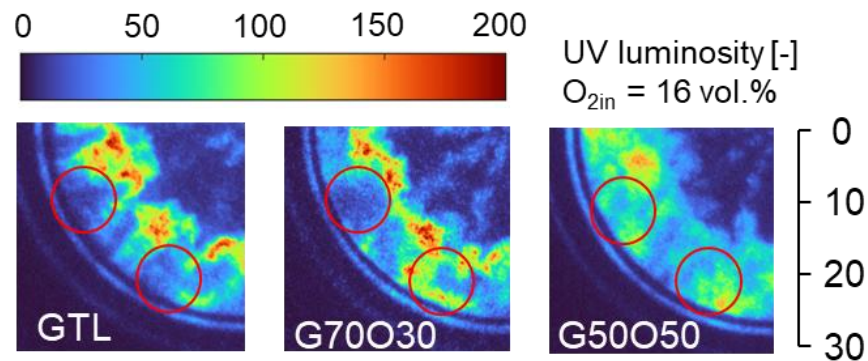
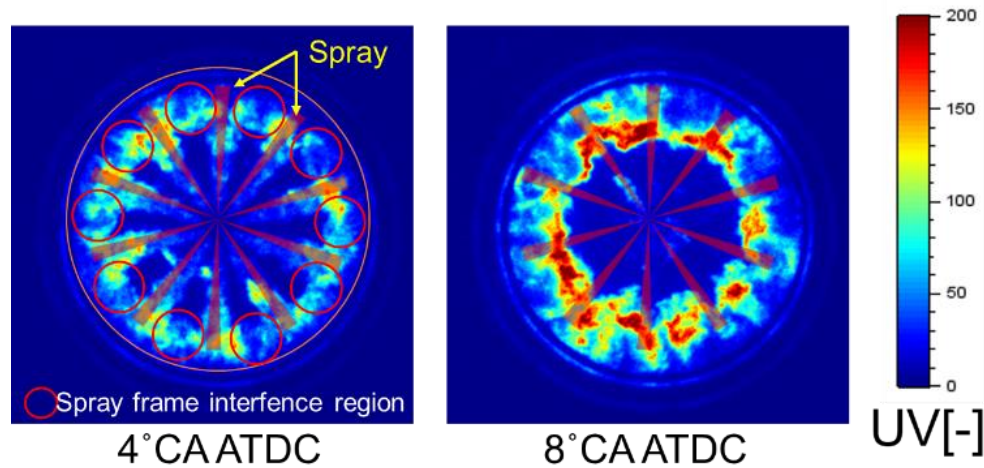
急速圧縮膨張装置による燃焼画像のOHラジカル撮影



- GTLは筒内におけるOH生成が極端であるが OME_{mix} を混合するとOHラジカルの生成が平滑化する
- OME_{mix} を混合すると燃焼が早く終了する



OME_{mix}の燃焼評価：急速圧縮膨張装置 OHラジカルのシリンダ内分布画像



炭化水素系燃料(軽油、GTL)の燃焼:

<4CA ATDC時点>

噴霧火炎が燃焼室壁面に衝突後、壁面に沿って移動し噴霧同士が衝突すると、噴霧干渉領域で当量比の濃い領域ができて酸素欠乏状態となり反応が停止し、未燃燃料やスモークが生成する。

<8CA ATDC時点>

壁面から燃焼室中央部への流動に乗ると未燃燃料やスモークの再酸化が起こる(赤い領域)。

→これが「後燃え」として熱発生率に現れる

GTLとOME_{mix}混合燃料の燃焼(@6CA ATDC):

GTLでは噴霧干渉領域で反応が停止する領域があるが、OME_{mix}の混合割合を増やすと噴霧干渉領域においても酸化反応が継続する。

円周方向における平均OHラジカルの時系列変化:
GTLにみられる再酸化がOME_{mix}の混合で無くなり燃焼期間が短縮する。

1. はじめに

- 研究背景および研究目的
- JPECのNEDO液体合成燃料(e-fuel)研究
- 研究方法

2. GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

3. OME_{mix}の評価

- ポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME_{mix})の紹介と実験燃料の性能
- OME_{mix}の燃焼評価: エンジン試験(熱効率関連因子、排出ガス特性)
- OME_{mix}の燃焼評価: 急速圧縮膨張装置による試験(OHラジカルのシリンダ内分布画像)

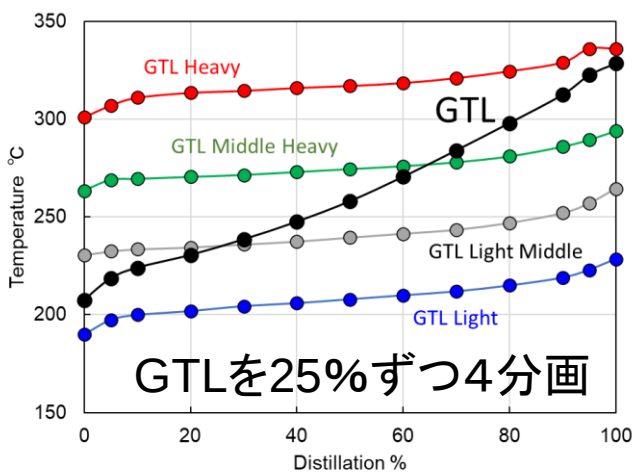
4. 分画燃料の評価

- エンジン試験: 熱効率関連因子と排出ガス性能
- エンジンおよび急速圧縮膨張装置による試験: Heavy-cut GTLの性能評価

5. JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証

6. まとめ

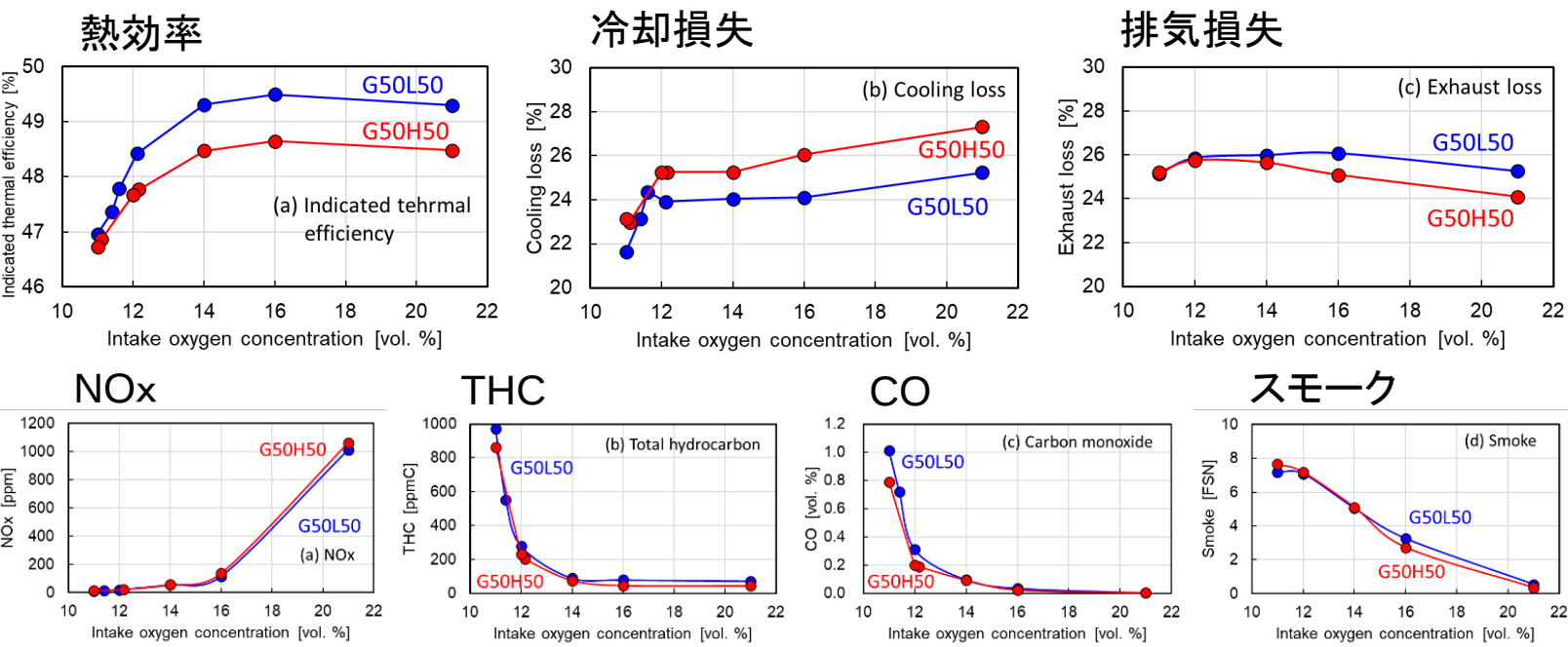
分画燃料の評価： エンジン試験 熱効率関連因子と排出ガス性能



エンジン運転が不安定にならないように、エンジン試験ではGTLにGTL LightまたはGTL Heavyを1:1で混合したG50L50およびG50H50を使用した

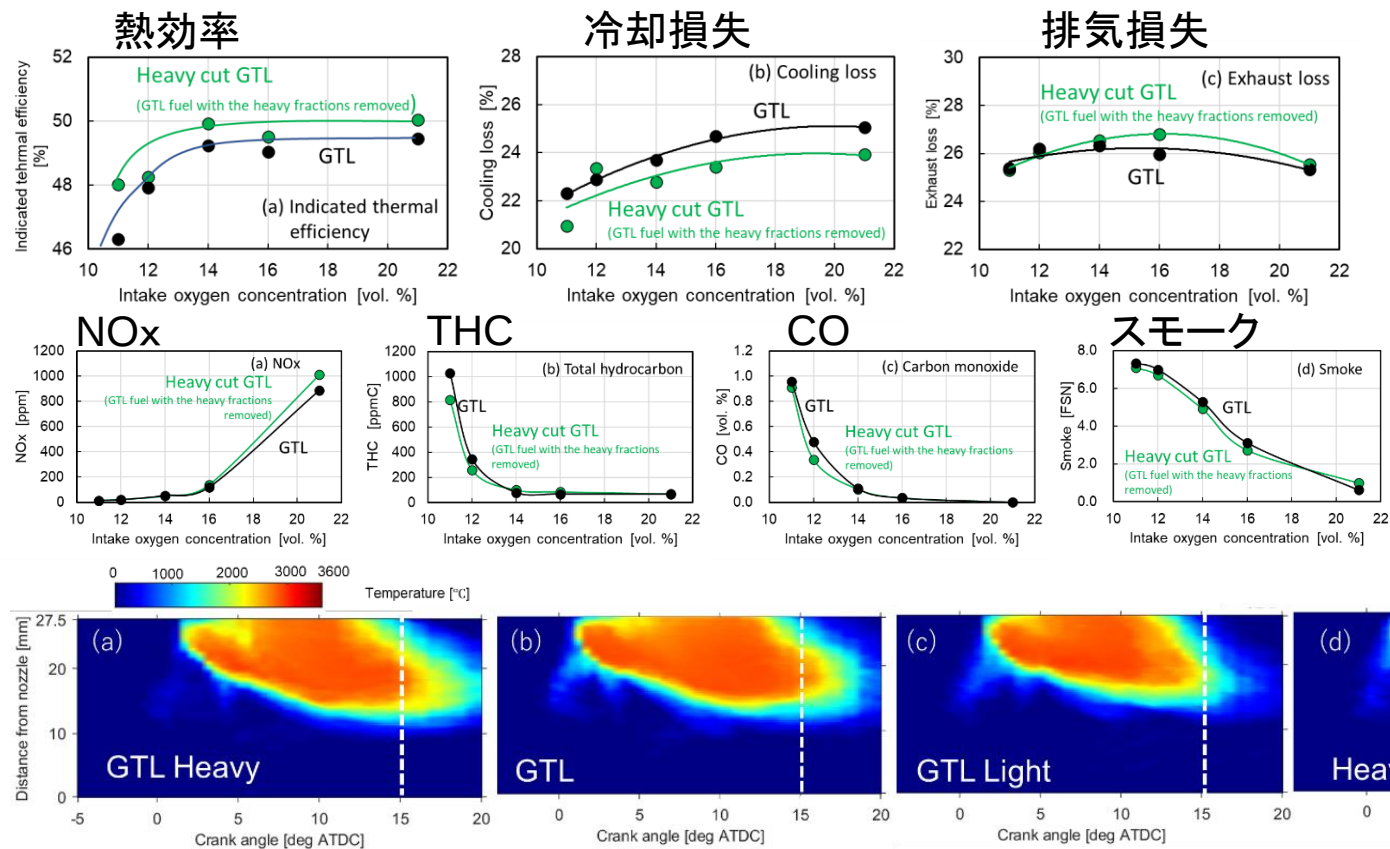
エンジン試験条件

Fuels	GTL, G70O30, G50O50
IMEP [kPa]	900
Boost pressure [kPa]	140
Engine speed [rpm]	1600
Pilot injection timing [°CA ATDC]	-10.5
Main injection timing [°CA ATDC]	Adjusted to be the main combustion start at TDC
Intake gas temperature [°C]	30
Intake oxygen concentration [vol.%]	11, 12, 14, 16, 21
Coolant temperature [°C]	80
Fuel injection pressure [MPa]	150



- G50H50はG50L50よりも熱効率が低い
- 排気エミッションには燃料間の差がみられない

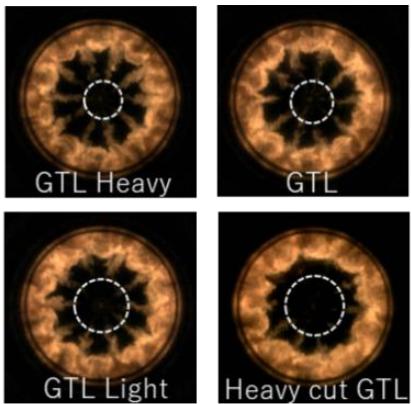
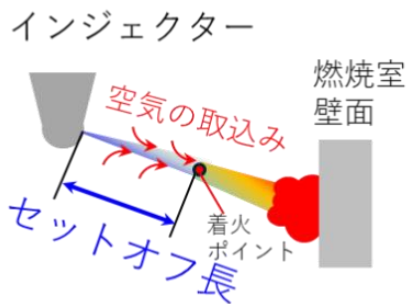
分画燃料の評価: Heavy-cut GTLの性能評価



Heavy cut GTLとは:
GTLから重質なGTL Heavyをカットして
軽質化した燃料

- GTL中から重質留分を取り除くと、
- 熱効率が向上する
 - スモークが若干減少する

セットオフ長の評価



円周方向における燃焼温度の時系列変化:
重質留分をカットすると着火性が悪くなるため
予混合期間が延びてセットオフ長が伸長する。
その結果、空気との混合が進み燃料の蒸発が
改善されて燃焼期間が短くなり、熱効率の向上
とスモークの排出低減につながる。

1. はじめに

- 研究背景および研究目的
- JPECのNEDO液体合成燃料(e-fuel)研究
- 研究方法

2. GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

3. OME_{mix}の評価

- ポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME_{mix})の紹介と実験燃料の性能
- OME_{mix}の燃焼評価: エンジン試験(熱効率関連因子、排出ガス特性)
- OME_{mix}の燃焼評価: 急速圧縮膨張装置による試験(OHラジカルのシリンダ内分布画像)

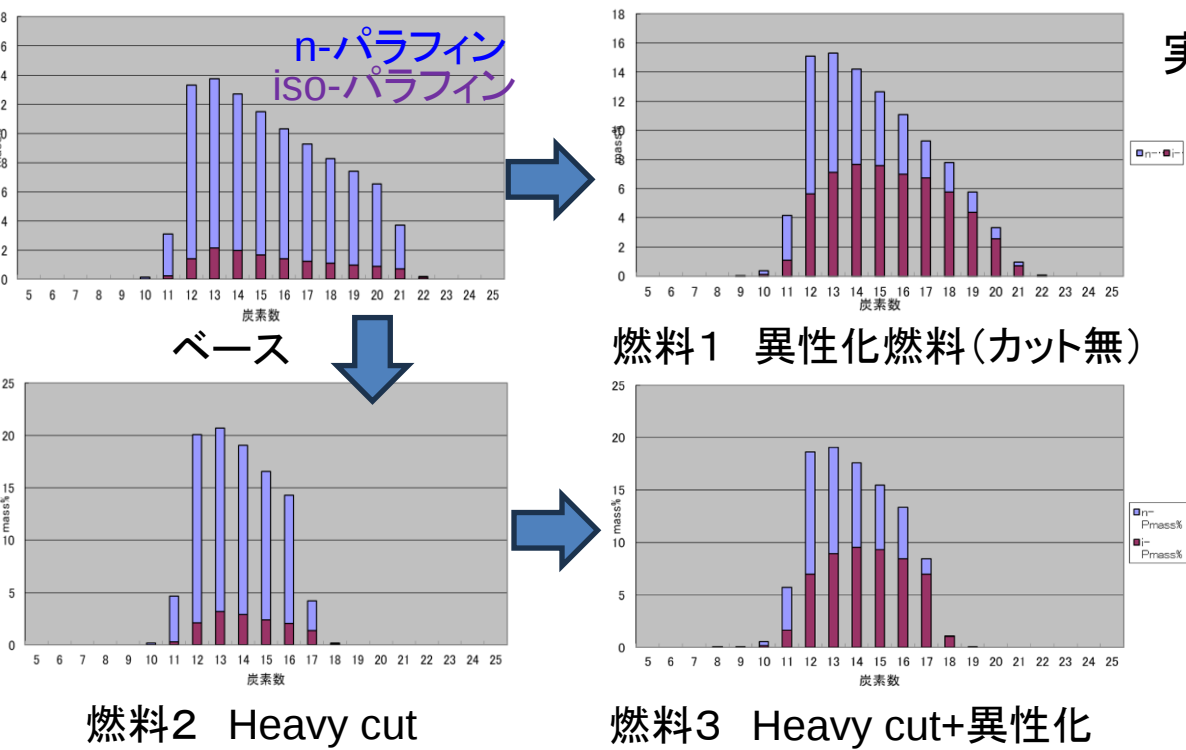
4. 分画燃料の評価

- エンジン試験: 熱効率関連因子と排出ガス性能
- エンジンおよび急速圧縮膨張装置による試験: Heavy-cut GTLの性能評価

5. JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証

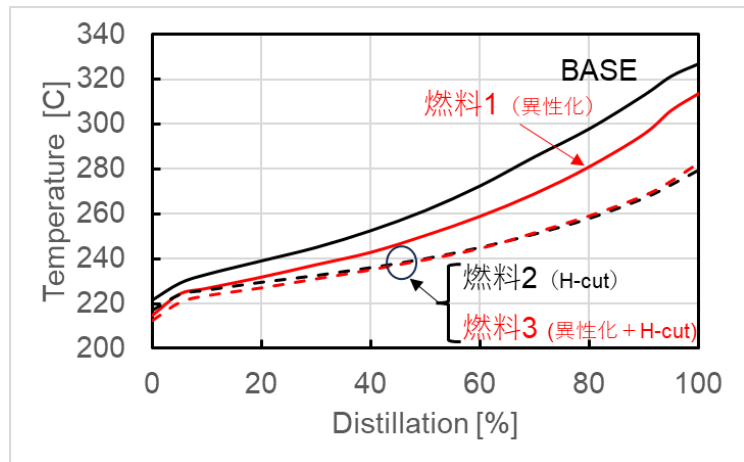
6. まとめ

JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証



実用化を考慮し

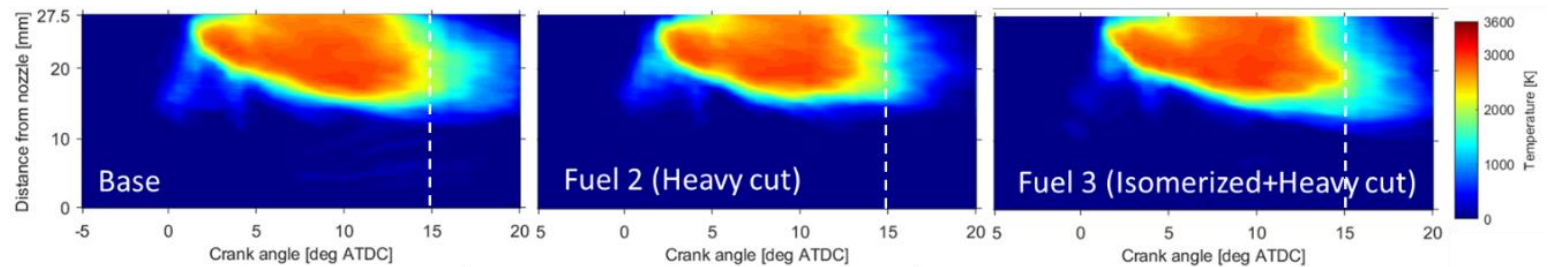
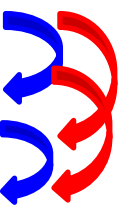
- ベース燃料: 2kW級プラントで作成したFT油
- 燃料1: 低温流動性に対応した異性化(イソ化)燃料
- 燃料2: ベース燃料の270℃以上の留分をカットした軽質化燃料
- 燃料3: 燃料2の270℃以上の留分をカットした軽質化燃料



注意) 燃料1は単なる異性化ではなく、軽質化の影響も出ている

単段噴射の着火遅れ

	Heavy cut	異性化	着火時期 CA ATDC
ベース	×	×	-1.34
燃料1	×	○	-1.19
燃料2	○	×	-1.23
燃料3	○	○	-1



異性化(青矢印): 着火遅れが長くなる
Heavy cut(赤矢印): 着火遅れが長くなる

中) 重質留分をカットすると燃焼期間は短くなる
右) 異性化すると燃焼期間は長くなる

1. はじめに

- 研究背景および研究目的
- JPECのNEDO液体合成燃料(e-fuel)研究
- 研究方法

2. GTLのディーゼル燃焼性能の把握(エンジン試験)

3. OME_{mix}の評価

- ポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME_{mix})の紹介と実験燃料の性能
- OME_{mix}の燃焼評価: エンジン試験(熱効率関連因子、排出ガス特性)
- OME_{mix}の燃焼評価: 急速圧縮膨張装置による試験(OHラジカルのシリンダ内分布画像)

4. 分画燃料の評価

- エンジン試験: 熱効率関連因子と排出ガス性能
- エンジンおよび急速圧縮膨張装置による試験: Heavy-cut GTLの性能評価

5. JPEC基盤研究所で作成したFT液体合成燃料を用いた検証

6. まとめ

1. GTLは軽油よりも芳香族分が少なく着火性に優れるが、多段噴射での燃焼においては軽油とGTLにエンジン性能にほとんど差異はない。
2. OME_{mix} は噴霧干渉領域におけるスモーク生成を抑制し後燃え期間を短縮する効果があり、GTLに OME_{mix} を30%程度混合すると現行ディーゼルエンジンのスモーク排出低減と熱効率の向上を図れる。しかし、 OME_{mix} を更に増量する場合には燃料の発熱量に応じてインジェクターを適合させる必要がある。
3. 液体合成燃料の高沸点留分をカットした燃料を使用すると、噴射してから着火するまでの間に予混合化が進行し等容度の高い燃焼をするため、ディーゼルエンジンの熱効率が向上しスモーク排出を抑制できる。
4. 液体合成燃料の異性化は、着火の際の熱発生率の立ち上がりを緩慢にし燃焼期間を伸張させるが、多段噴射においてはその差を確認することはできない。
5. OME_{mix} の発熱量に適合させたインジェクターを用いると、燃料が壁面衝突する際のすすの生成を抑制でき、噴霧干渉領域でのすすの生成を低下させることができる。
6. OME_{mix} の発熱量に適合させたインジェクターを用いると、熱効率を向上とスモーク排出低減の両立を図ることができる。

ARTICLE INFO

Article ID: 04-18-02-0010
© 2025 SAE International
doi:10.4271/04-18-02-0010

Diesel Engine Performance and Combustion Imaging Analysis of Gas-to-Liquid and Polyoxymethylene Dimethyl Ether Blended Fuels

Gen Shibata,¹ Haoyu Yuan,² Hiroya Yamamoto,² Shusuke Tanaka,² and Hideyuki Ogawa²

¹Hokkaido University, Research Faculty of Engineering, Japan

²Hokkaido University, Japan

Abstract

To reduce carbon dioxide emissions from automobiles, the introduction of electric vehicles to the market is important; however, it is challenging to replace all existing IC engine vehicles with electric ones. Consequently, there is increasing anticipation for the use of carbon-neutral fuels, such as e-fuels.

This study investigates the effects of GTL (gas-to-liquid), as a substitute for e-fuel, produced from natural gas via the Fischer-Tropsch synthesis method and polyoxymethylene dimethyl ether (OME_{mx}) produced from methanol, on engine performance. Additionally, combustion image analysis was conducted using a rapid compression and expansion machine (RCEM).

GTL fuel combusts similarly to conventional diesel fuel but has slightly lower smoke emissions because it does not contain aromatic hydrocarbons. Further, its high cetane number results in better ignition properties. During the combustion, unburnt hydrocarbons and smoke are generated in the spray flame interference region near the cylinder wall due to insufficient oxygen, and as it moves from the cylinder wall toward the center of the cylinder, the re-oxidation is observed, which is reflected in the heat release rate as the after-burning duration.

When the OME_{mx} is mixed with hydrocarbon fuels such as GTL, combustion continues even in the spray flame interference region, leading to a reduction in the after-burning duration and significantly lower smoke emissions.

Further, the GTL was divided into four distillation regions, that are GTL Light, GTL Light Middle, GTL Middle Heavy, and GTL Heavy, and the effects of low and high-boiling fractions in GTL on diesel combustion were investigated. Heavy fractions have excellent ignition properties, resulting in shorter lift-off (set-off) length during combustion. However, due to the poor evaporation characteristics, they have longer high-temperature residence time, leading to greater cooling losses and reduced thermal efficiency. On the other hand, light fractions have longer lift-off lengths, mix well with air before combustion, and have shorter combustion durations compared to heavy fractions. Finally, an engine performance was evaluated using a fuel mixture of the fuel with the heavy fractions removed from GTL (heavy-cut GTL) and OME_{mx} in a 1:1 ratio.

History

Received: 12 Nov 2024
Revised: 27 Dec 2024
Accepted: 17 Jan 2025
e-Available: 12 Feb 2025

Keywords

e-fuel, Polyoxymethylene dimethyl ether, Diesel engine, Rapid compression and expansion machine, Two-color method, OH radical analysis

Citation

Shibata, G., Yuan, H., Yamamoto, H., Tanaka, S. et al., "Diesel Engine Performance and Combustion Imaging Analysis of Gas-to-Liquid and Polyoxymethylene Dimethyl Ether Blended Fuels," SAE Int. J. Fuels Lubr. 18(2):2025, doi:10.4271/04-18-02-0010.

ISSN: 1946-3952
e-ISSN: 1946-3960

1

Diesel Engine Performance and Combustion Imaging Analysis of Gas-to-liquid and Polyoxymethylene Dimethyl Ether Blended Fuels

SAE International Journal of Fuels and Lubricants 04-18-02-0010
(Issued on Feb. 12 2025)

[Gen Shibata](#), Haoyu Yuan, Hiroya Yamamoto, Shusuke Tanaka, Hideyuki Ogawa

ご清聴ありがとうございました



本発表内容は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO*）からの委託事業によるものです。関係各位に感謝の意を表します。

*New Energy and Industrial Technology Development Organization