

2015 ClassNK 春季技術セミナー

エマルジョン燃料適用による船用ディーゼル 機関の環境適合技術に関する研究開発 —NOx削減・CO2削減の実用的技術の確立—

日本海事協会殿「業界要望による共同研究
スキーム」 NK・MIJAC・ナノフュエル共同実施
(九大高崎研・ヤンマーの協力で実施)

2015年 6月

株式会社マリタイムイノベーションジャパン
高石 龍夫

1. 本研究の背景・目的

背景

- 船用ディーゼルエンジンでは**IMO排ガス規制適合 (NOx低減)**へ向けて各種技術開発が実施されているが、EGRやSCRは種々の課題を伴っている。
⇒より実用的で経済性の高い手法の確立が求められており、**エマルジョン燃料の可能性 (NOx低減、燃費率改善) に着目**。
Tier III NOx規制適合のキー技術になることが期待される。

目的

- エマルジョン燃料による環境性と経済性の両立化を図るべく、NOx排出特性、燃費率特性の最適化を目指す。
先ずはA重油でのNOx低減・燃費率改善確認エンジン試験及び基礎燃焼試験を実施し、**エマルジョン燃料の有効性**を検証する。
- 実船搭載へ向けての課題抽出により次段階研究開発に備える。

エマルジョン燃料による排ガス低減・燃焼改善

〔NO_x低減〕 ディーゼル機関のNO_x排出はほとんど
サーマルNO_x、生成速度は概略次式で示される

$$d[\text{NO}]/dt = K_f \cdot [\text{N}_2] \cdot [\text{O}_2]^{1/2}$$

ここで、 $K_f = K_{f0} \cdot \exp(-C_{f0}/T)$

Tは反応域温度であり、次式で示す断熱燃焼温度T_bと
相関性が高いと考えられる。

$$T_b = H_l / G_w \cdot C_{pm} + T_0$$

ここで、H_l: 燃焼域発生熱量、G_w・C_{pm}: 燃焼域熱容量

**NO_x低減にはO₂濃度の低下、反応域温度Tの低下
(熱容量増大)が有効 ⇒ エマルジョン燃料適用**

〔Smoke低減〕 Smokeは空気過剰率 $\lambda < 1$ の過濃混合気燃焼域で発生し、その再燃焼の不充分さによりSmokeが燃焼域で生成される

⇒ Smoke低減には、発生したSmokeを燃焼させる O_2 の不足、それを改善するための混合気運動エネルギーの不足等を改善する必要がある

⇒ エマルジョン燃料は噴霧内への空気導入量の増加を伴い、これにより燃焼改善、Smoke低減が実現される

2. 本研究開発の目標

1) **NO_x排出量の大幅削減の可能性検証**

- NO_x重視の場合の最大削減率: 80%

2) **機関性能・排ガス特性の最適化の検証**

(NO_x/燃費率のトレードオフ改善)

- 燃費率削減: 1~2%、NO_x削減: 40%

3) **エマルジョンによるディーゼル燃焼改善の解明**

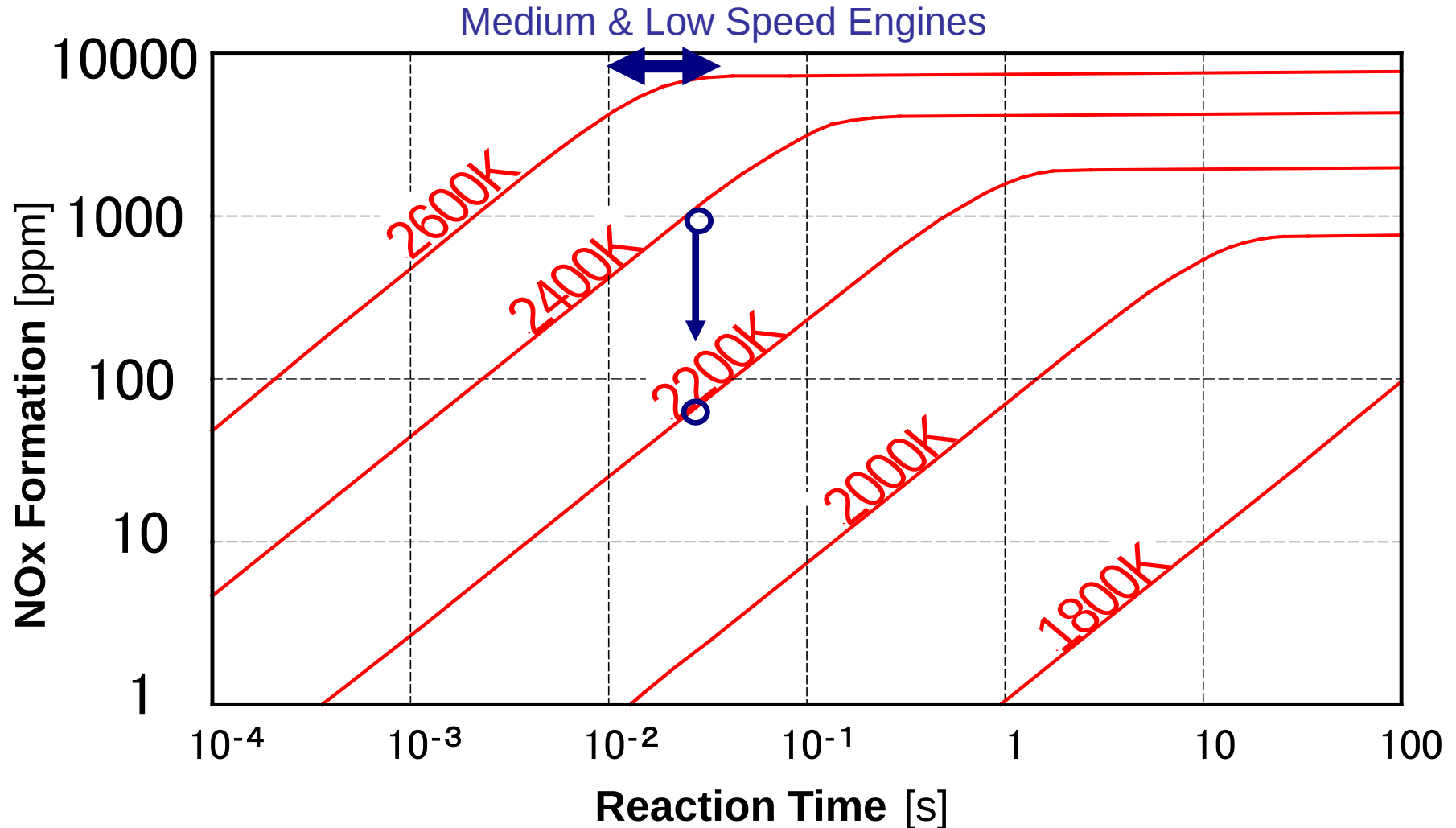
エマルジョン燃料の船用ディーゼル機関への実用化に向け、燃焼現象論的な考察をベースにエマルジョン燃料による燃焼特性改善の有効性追究

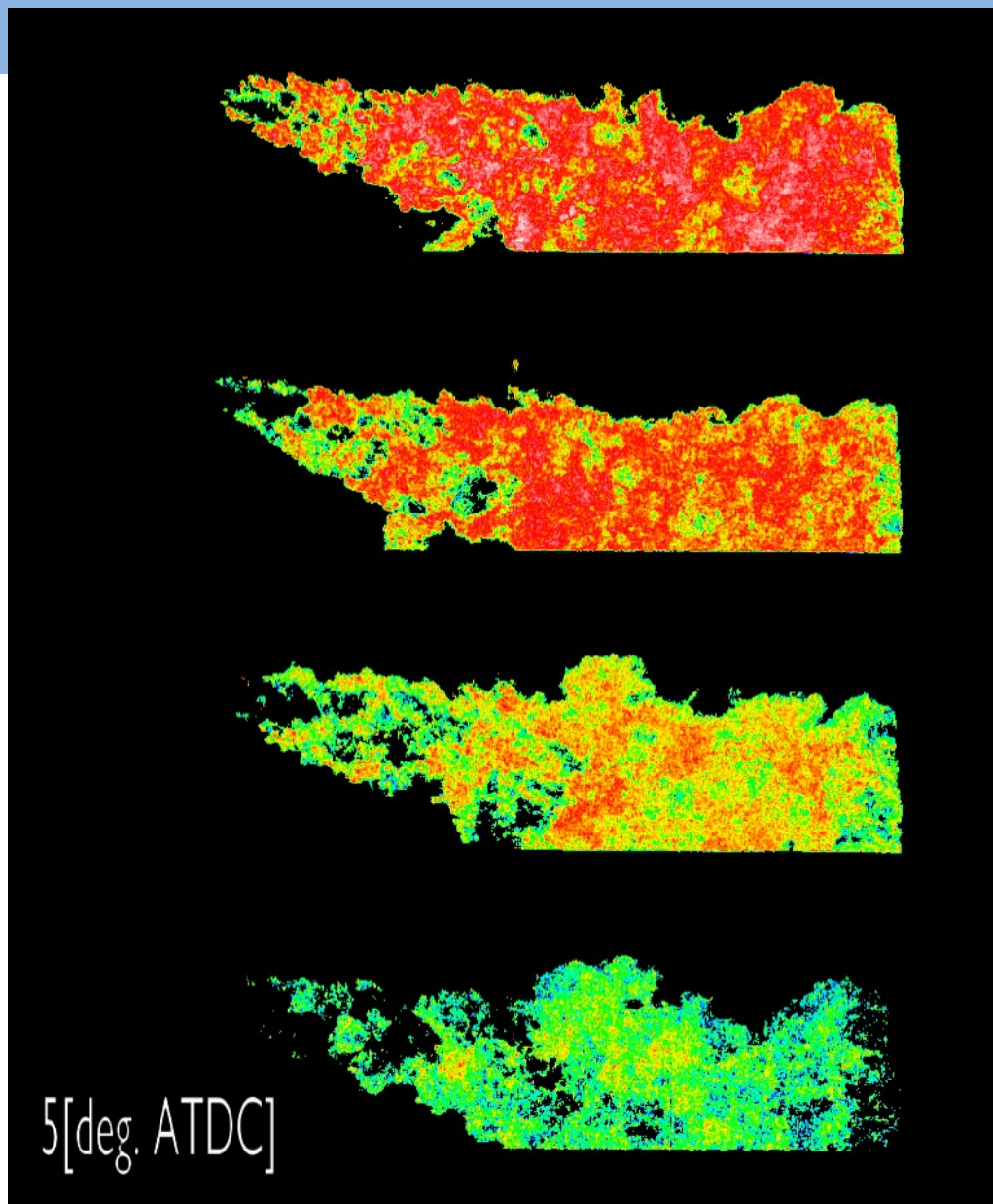
3. 実施内容(1)

- NO_x排出量の80%削減の可能性の追究
水エマルジョンだけでNO_xの80%削減は可能か？
- エマルジョン燃料による燃焼改善の考察
水エマルジョンによる後燃えの改善
- 基礎燃焼試験による新たな知見の検証

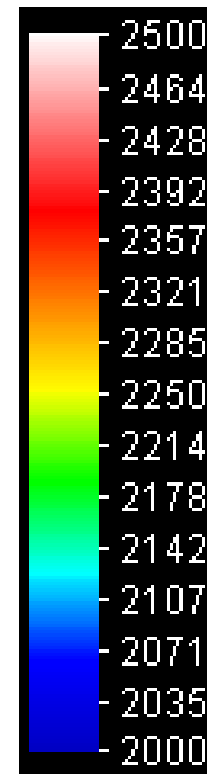
Combustion temperature and NOx formation

NOx生成量は燃焼温度（火炎温度）に敏感



燃烧前O₂%21%19%17%15%

設定酸素%の低減に
合わせて過給圧力を
増加し、燃烧に寄与
する酸素量を一定と
した条件



観察窓幅：200 mm

温度K

EGR燃烧観察例（軽油ディーゼル噴霧火炎温度）by 九大・高崎研

© Copyright 2013

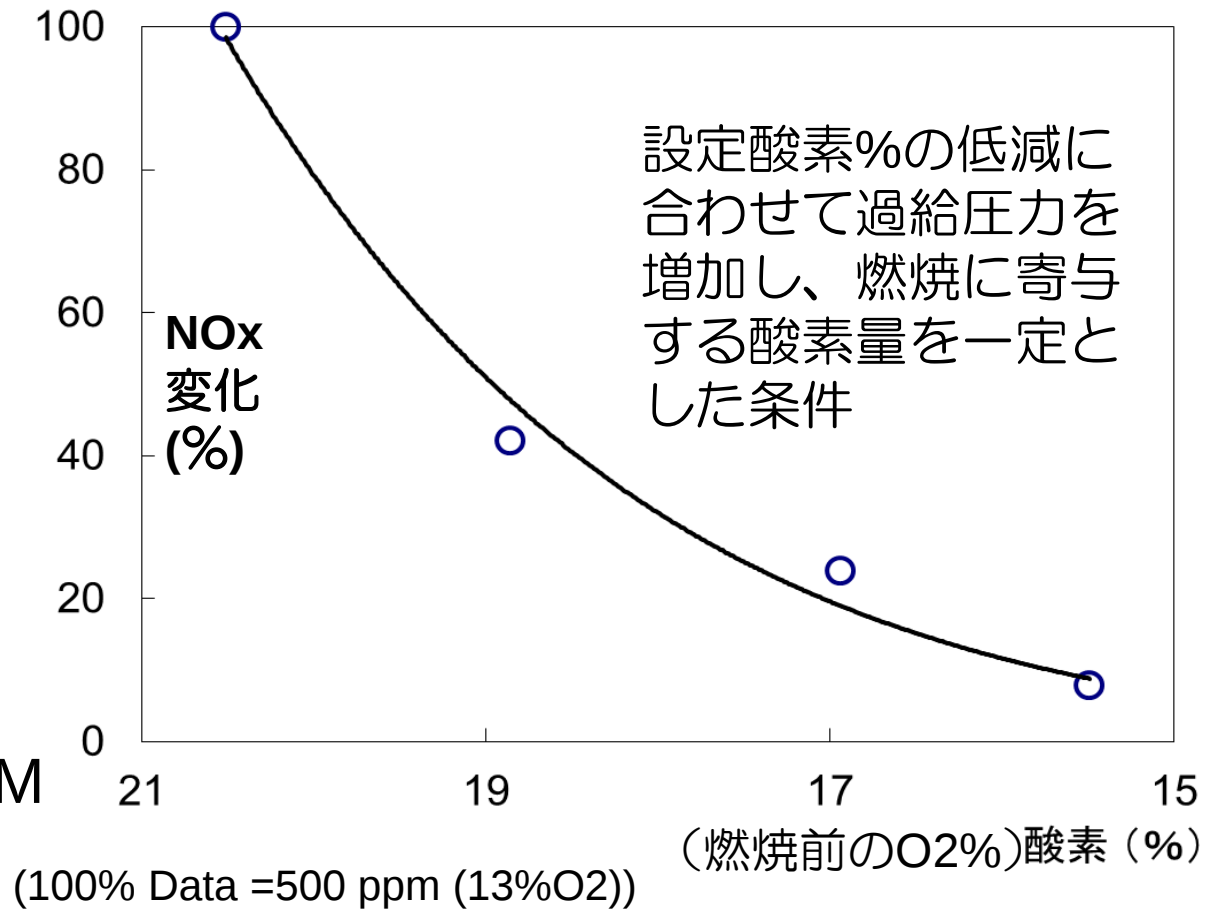
Maritime Innovation Japan Corporation

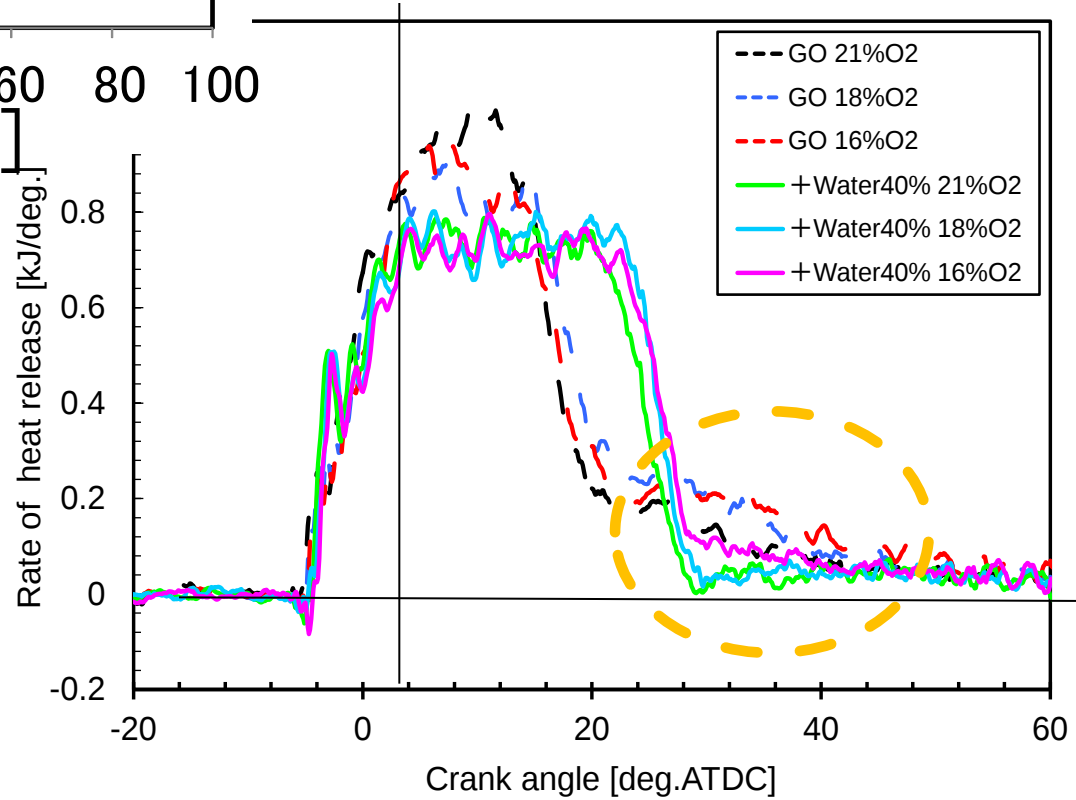
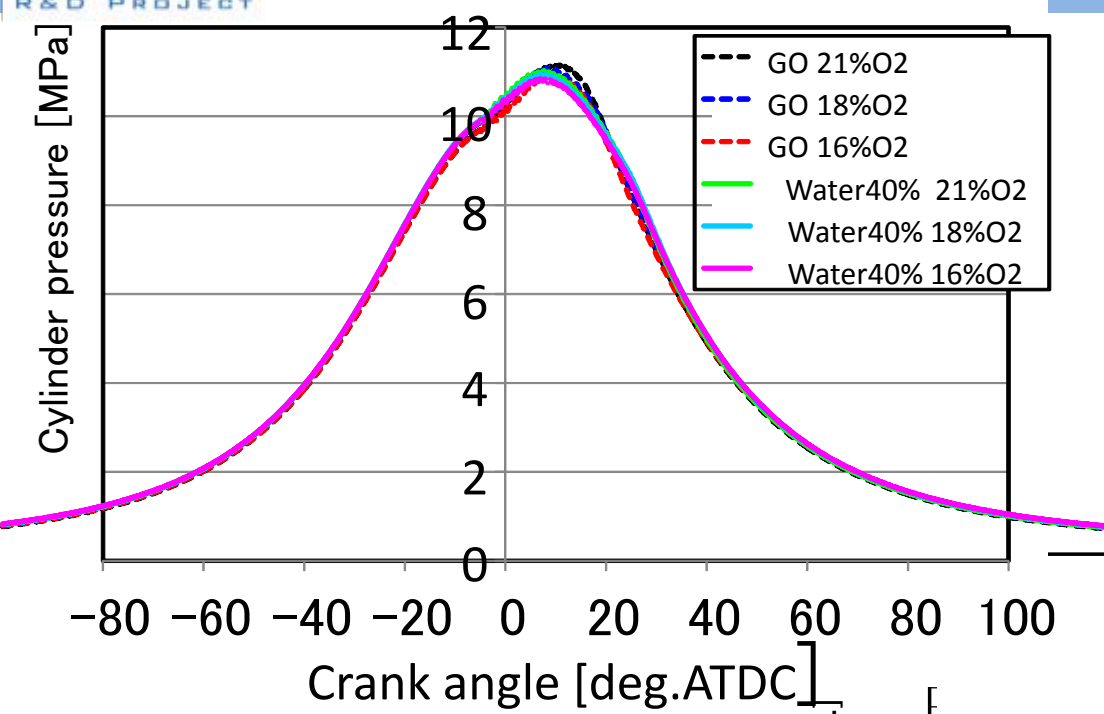
- EGR: 排気ガス再循環

- • 燃烧空気の酸素濃度をあえて下げる • •

EGRの効果の例

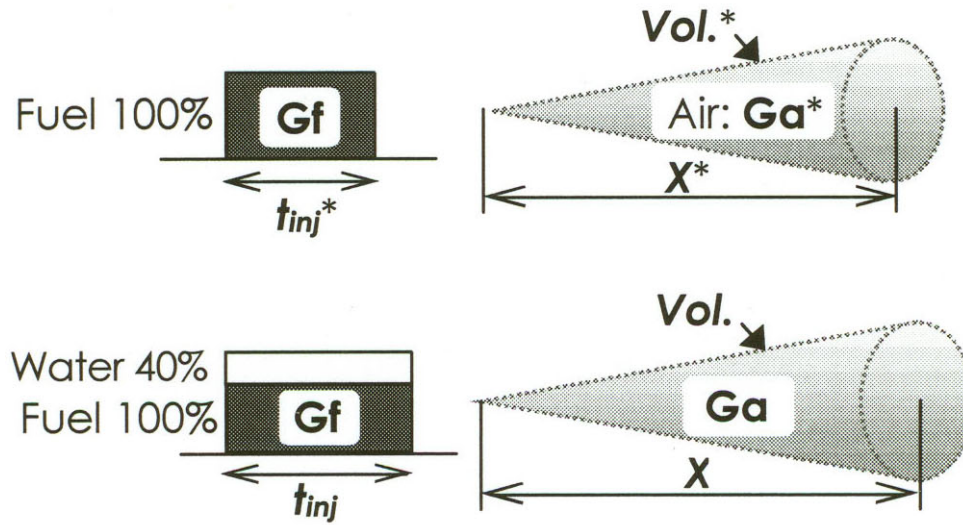
by九大RCEM





水エマルジョンによる
後燃え改善の効果 (RCEM)

Improvement of air-fuel ratio in spray



$$t_{inj} = t_{inj}^* \times 1.40 \longrightarrow \frac{Vol.}{Vol.^*} = 1.40^{3/2} \approx 1.66$$

$$\begin{aligned} X &\propto t_{inj}^{1/2} \\ Vol. &\propto t_{inj}^{3/2} \end{aligned}$$

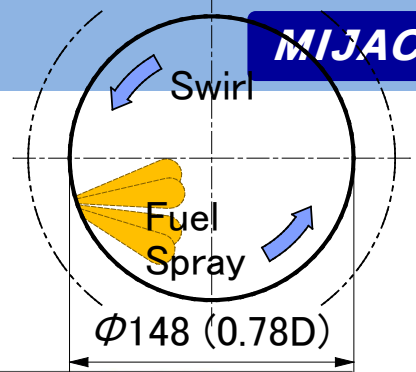
$$\begin{aligned} G_a &= 1.66 \times G_{a^*} \\ \frac{G_a}{G_f} &= 1.66 \times \frac{G_{a^*}}{G_f} \end{aligned}$$

G_a : mass of air
 G_f : mass of fuel

Calculation on improvement of air/fuel ratio in spray by water addition

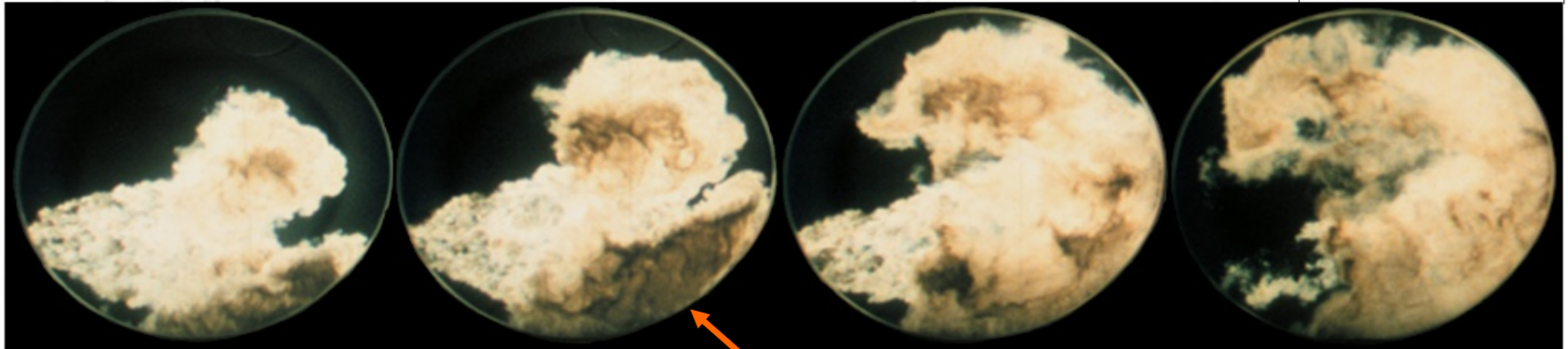
“140% momentum” forms larger spray cone than “100% momentum”.
Larger spray cone contains more air with same fuel amount.

水エマルジョンによる燃焼の変化

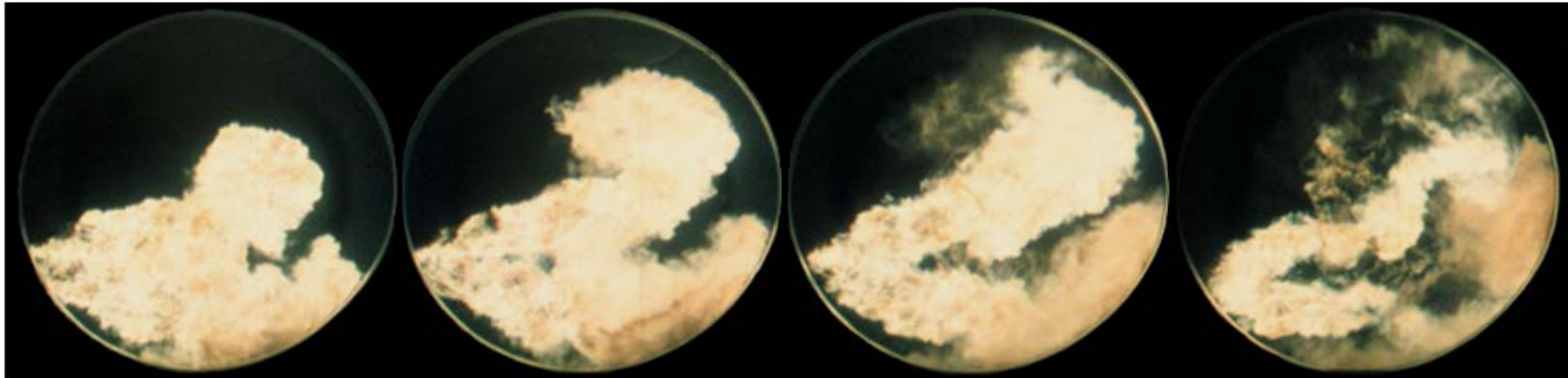


(a) BFO100%

(Injection start: 4° BTDC)



(b) BFO100%+ Water 25%



12.5°

17.5°

22.5°

27.5°
Crank angle deg. ATDC

3. 実施内容(2)

多量水エマルジョンによる

NOx排出量の80%削減検証

・・・基礎燃焼試験による新たな知見・・・

- ・水添加率 約100%程度

＊) 水添加率定義: 100% ⇒ 燃料: 水 = 100: 100

- ・燃料噴射弁ノズル噴口径増大による噴射期間延びの抑制

- ・パイロット噴射による着火性の確保

⇒ **NOx一桁削減
(水エマルジョンだけでTier III規制クリア)**

Properties of 'Gas Oil + water emulsion' (& methanol)

Fuel	GO	CH ₃ OH	GO+H ₂ O ①	GO+H ₂ O ②
Fuel : Water	100 : 0	100 : 0	Vol. 52 : 48 (100 : 93) Mass 47 : 53	Vol. 44 : 56 (100 : 129) Mass 39 : 61
Density [kg/m ³]	835	791	915	928
LCV [cal/g]	43.1	19.9	20.3	16.9
Latent heat / Total Q	0.5%	4%	5.5%	6.5%
Injection conditions				
Injection Pressure [MPa]	89	57	84	60
Injection hole diameter [mm]	φ0.5	φ0.8	φ0.7	φ0.8

- No. 058 Gas Oil**

Inj. Hole Dia. 0.5 [mm]

Inj. Press. 89.1 [MPa]
- No. 080 Methanol**

Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]

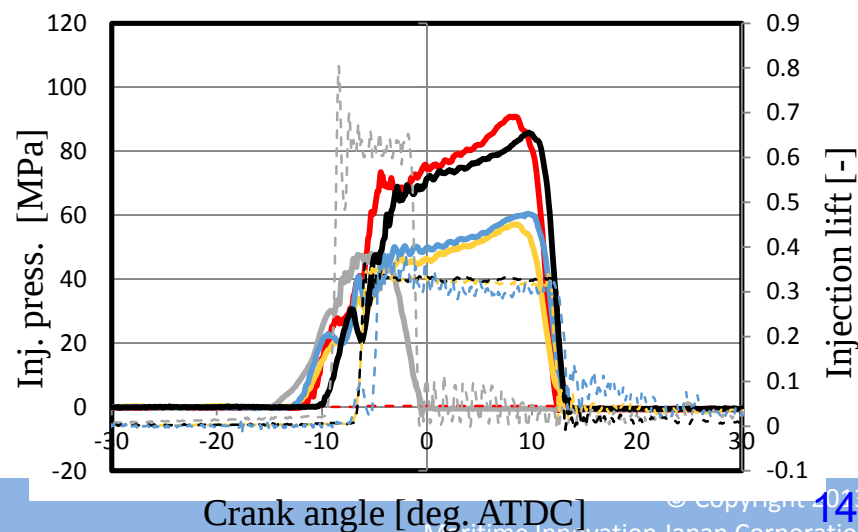
Inj. Press. 56.9 [MPa]
- No. 580 GO-water Emulsion)**
(GO: water = 43.6:56.4)

Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]

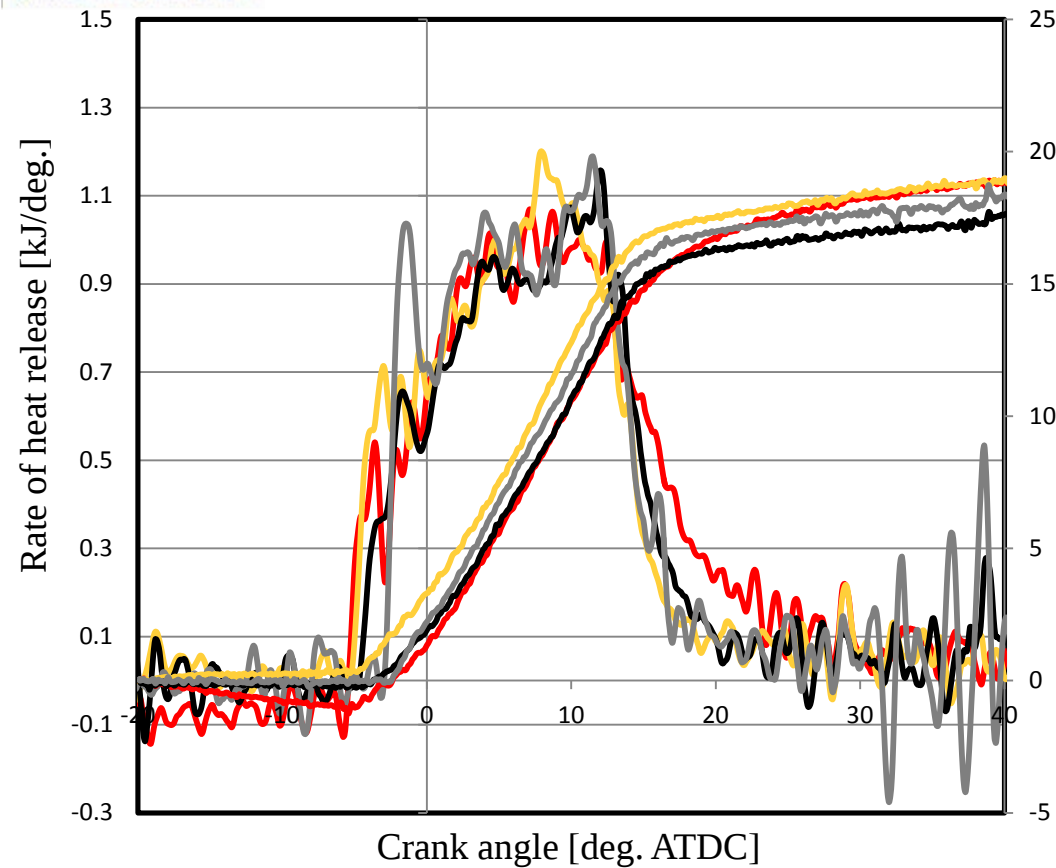
Inj. Press. 60.0 [MPa]
- No. 595 GO-water Emulsion)**
(GO: water = 51.7:48.3)

Inj. Hole Dia. 0.7 [mm]

Inj. Press. 84.0 [MPa]

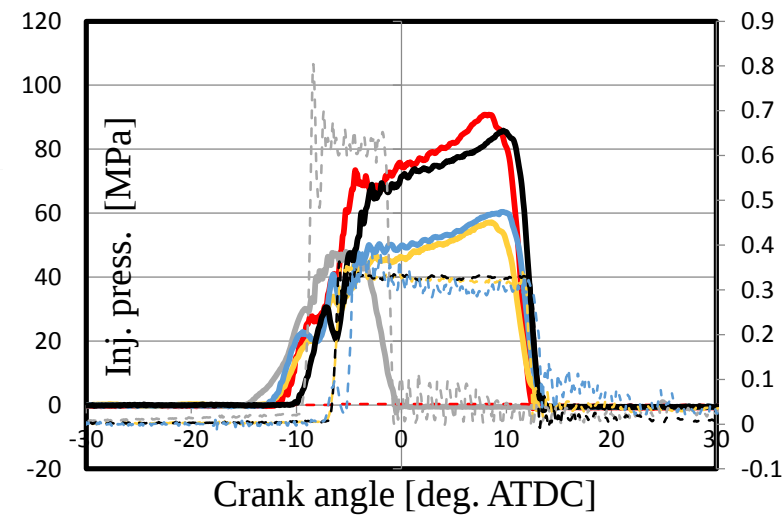


Crank angle [deg. ATDC]

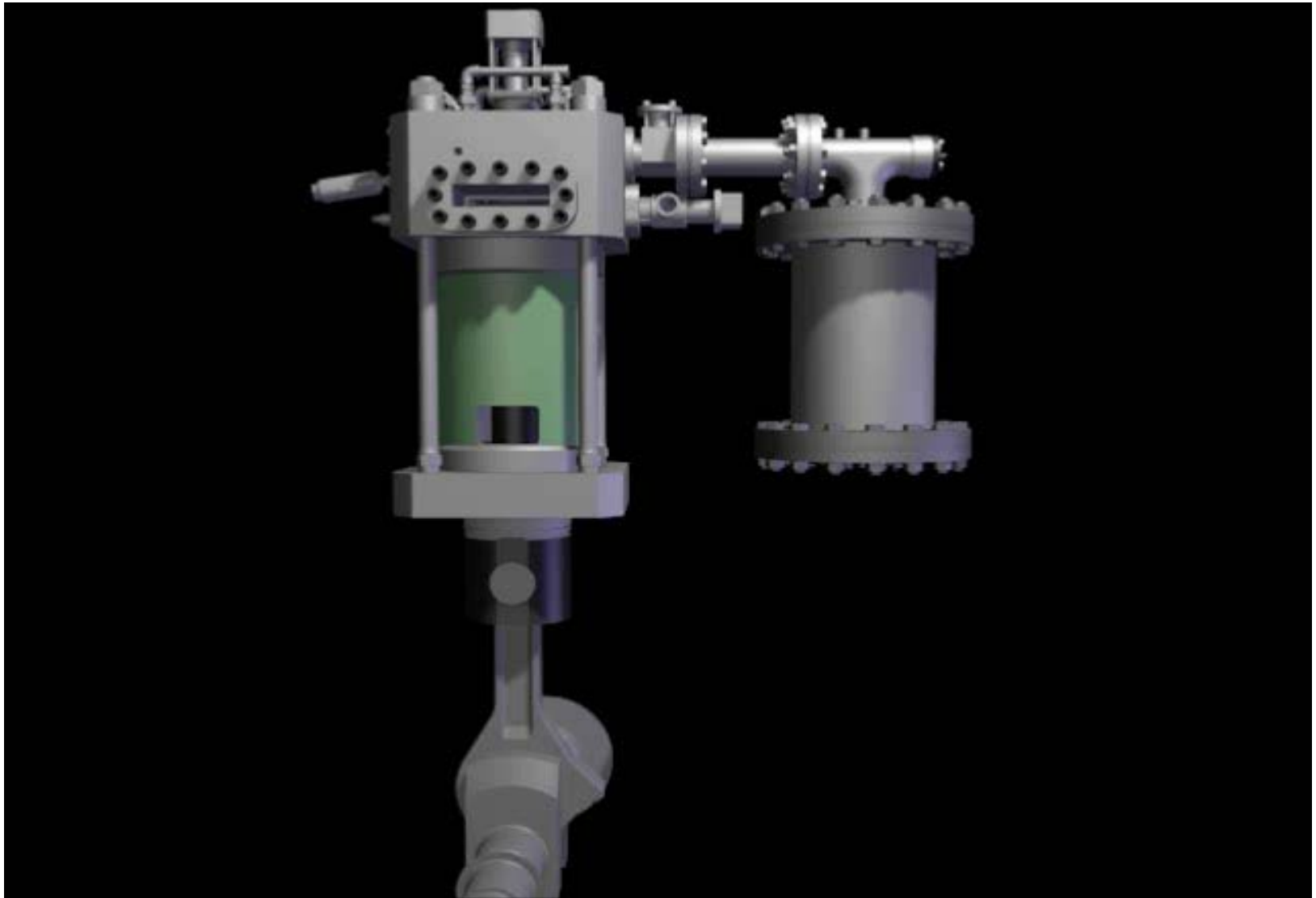


- Gas Oil**
Inj. Hole Dia. 0.5 [mm]
Inj. Press. **89.1** [MPa]
- Methanol**
Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]
Inj. Press. **56.9** [MPa]
- GO + H₂O (51.7:48.3)**
Inj. Hole Dia. 0.7 [mm]
Inj. Press. **84.0** [MPa]
- GO + H₂O (43.6:56.4)**
Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]
Inj. Press. **56.4** [MPa]

Emission	GO	CH ₃ OH	GO+H ₂ O ①52 : 48	GO+H ₂ O ②44 : 56
CO [ppm]	8	7	41	29
HC[ppm]	14	64	46	36
NOx [ppm]	263	95	34	14



RCEM: Highly-supercharged condition is realized by **double-stage compression**.
Frequent experiments in a short time are possible by **single-shot function**.



No. 058 **Gas Oil**

Inj. Hole Dia. 0.5 [mm]

Inj. Press. **89.1** [MPa]

No.080 **Methanol**

Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]

Inj. Press. **56.9** [MPa]

No. 580 **GO-water Emulsion)**

(GO: water = 43.6:56.4)

Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]

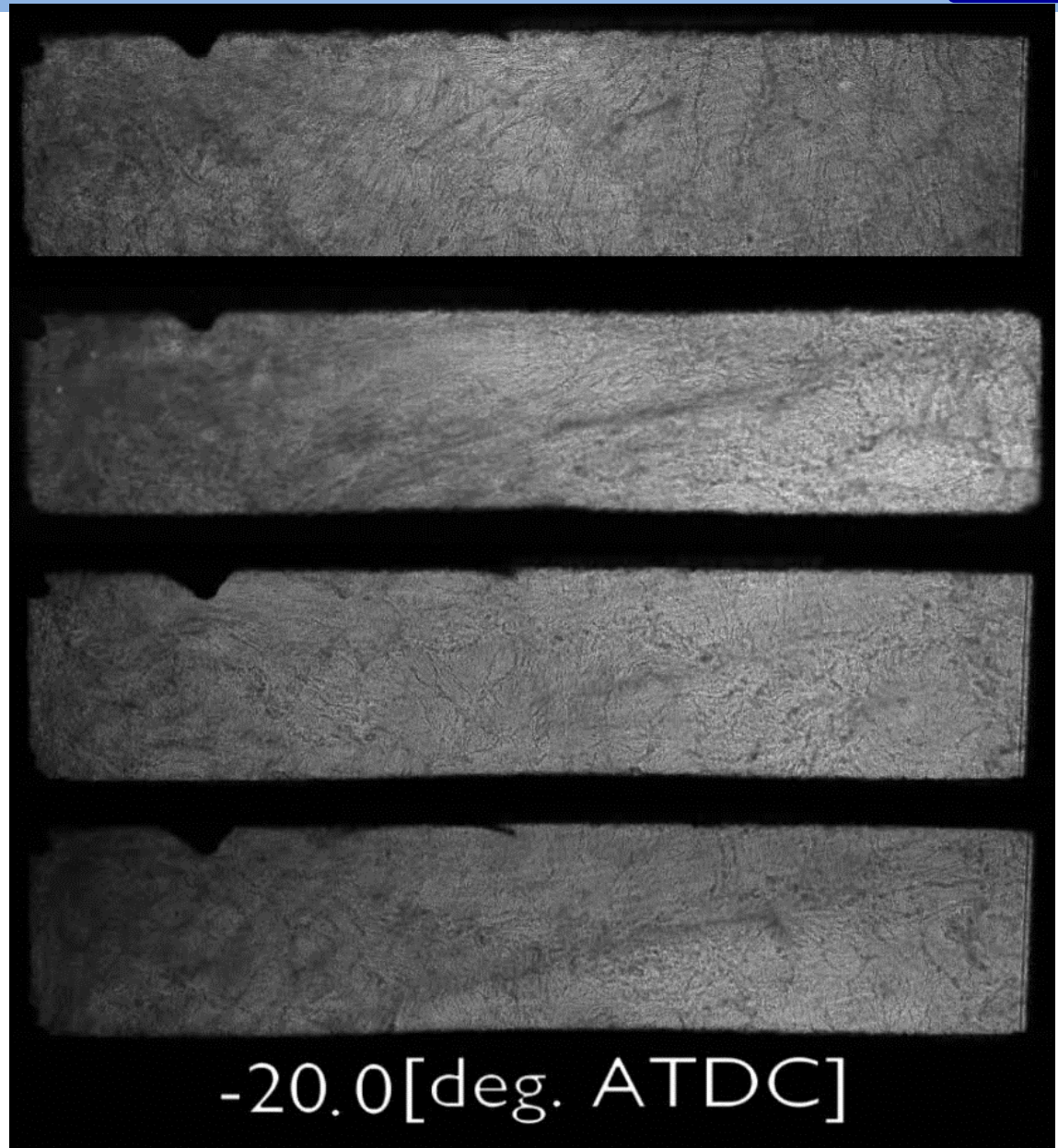
Inj. Press. **60.0** [MPa]

No. 595 **GO-water Emulsion)**

(GO: water = 51.7:48.3)

Inj. Hole Dia. 0.7 [mm]

Inj. Press. **84.0** [MPa]



-20.0[deg. ATDC]

窓幅200mm

No. 058 **Gas Oil (F16)**
Inj. Hole Dia. 0.5 [mm]
Inj. Press. **89.1** [MPa]

No.080 **Methanol (F2.8)**
Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]
Inj. Press. **56.9** [MPa]

No. 580 **GO-water Emulsion)**
(GO: water = 43.6:56.4) (F16)
Inj. Hole Dia. 0.8 [mm]
Inj. Press. **60.0** [MPa]

No. 595 **GO-water Emulsion)**
(GO: water = 51.7:48.3) (F16)
Inj. Hole Dia. 0.7 [mm]
Inj. Press. **84.0** [MPa]

-20.0[deg. ATDC]

3. 実施内容(3)

機関性能・排ガス特性の最適化の検証

・・・A重油エマルジョンの中速4サイクル
ディーゼル機関適用試験・・・

*) 水添加率定義の違い

本試験での水添加率20%⇒燃料:水=80:20

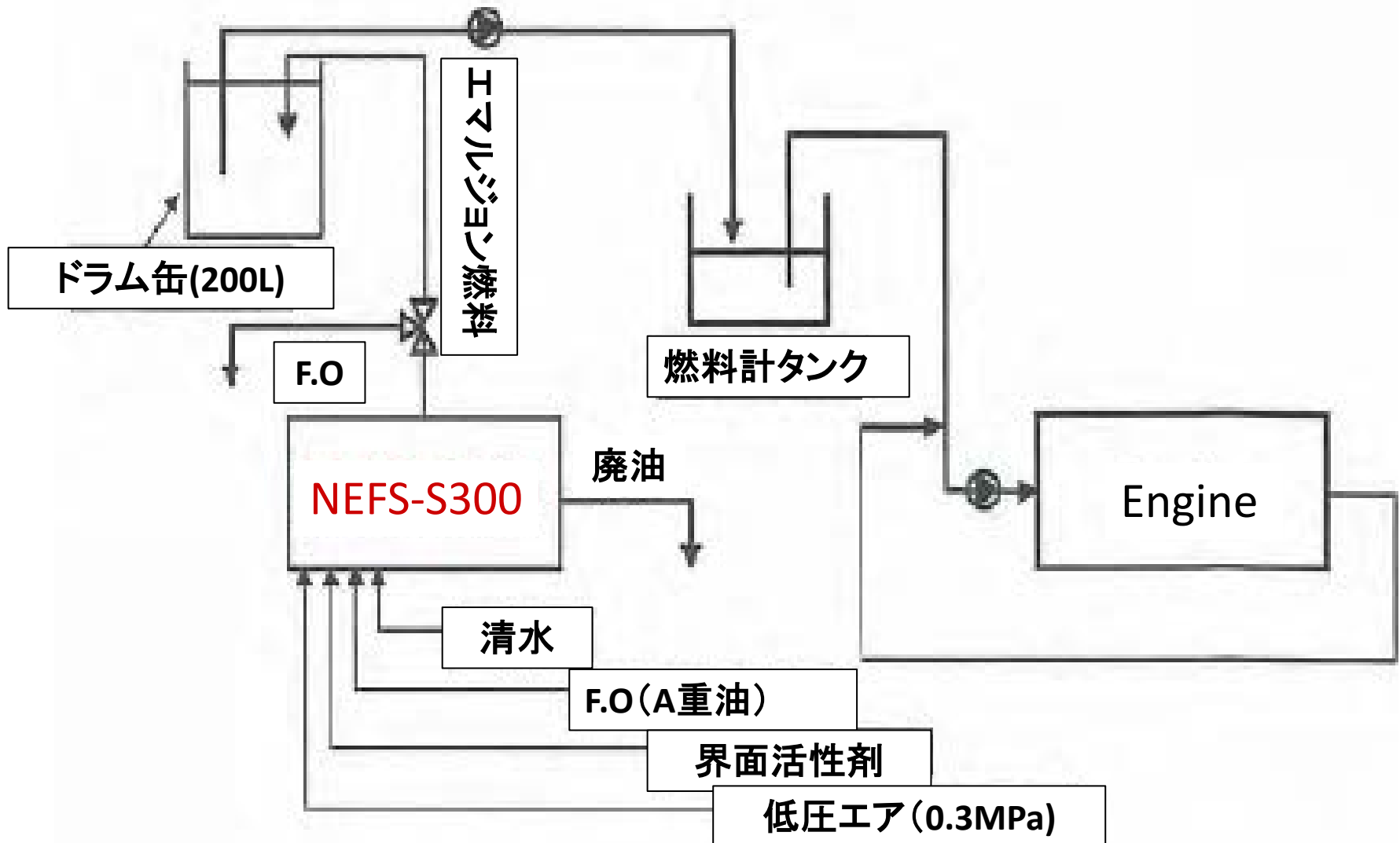
定義の共通化 上記20%⇒25% (燃料:水=100:25)

30%⇒43%, 40%⇒67%

機関主要諸元

Number of cylinder	6
Cylinder bore	180mm
Piston stroke	280mm
Displacement	42.7 Litter

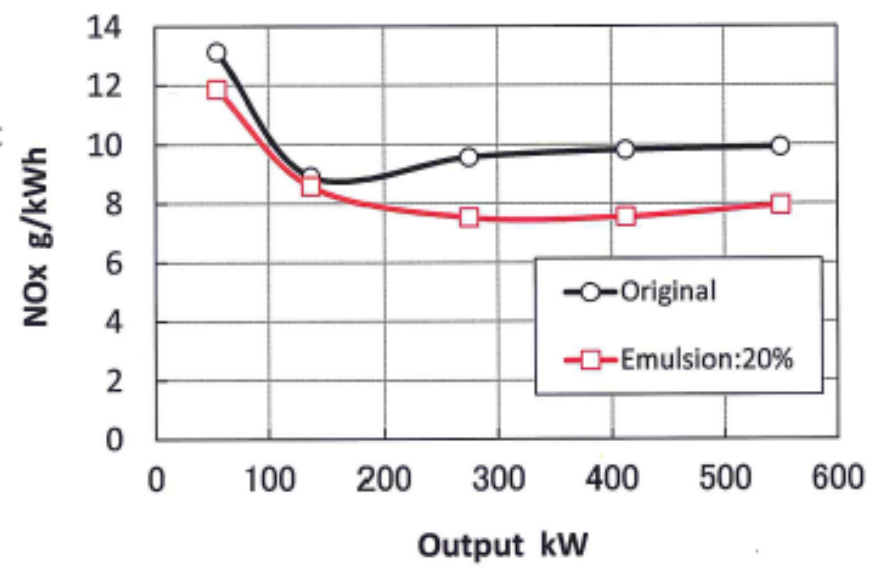
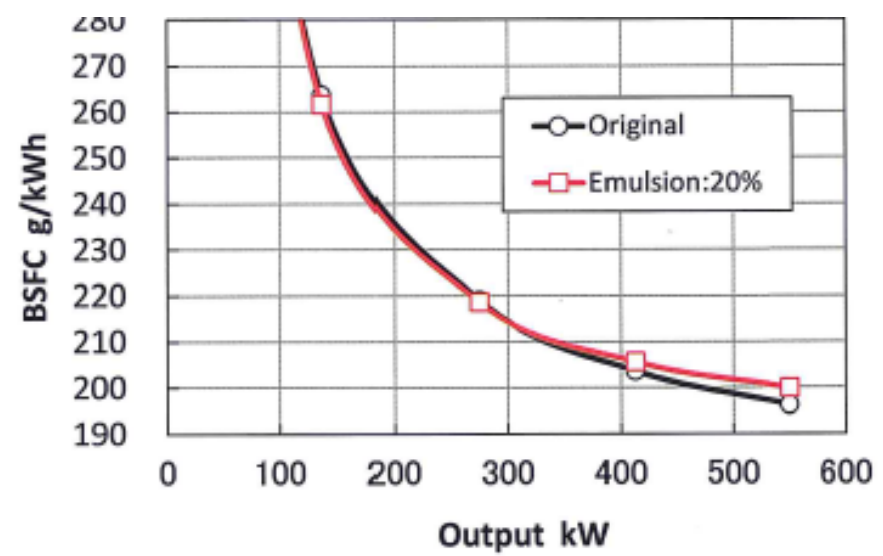
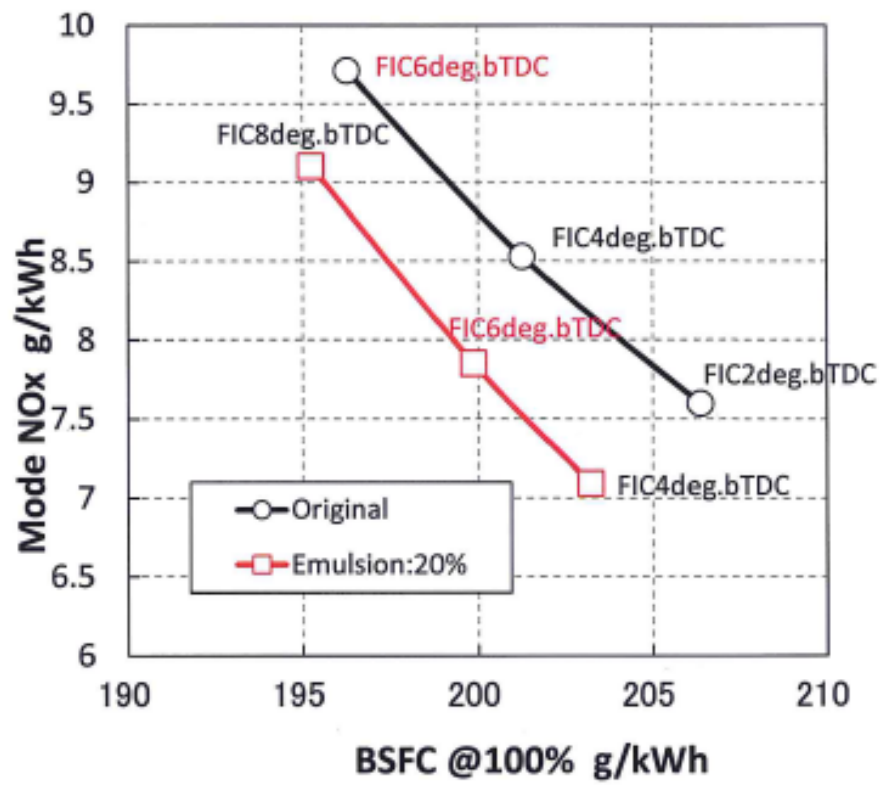
エマルジョン燃料系統図



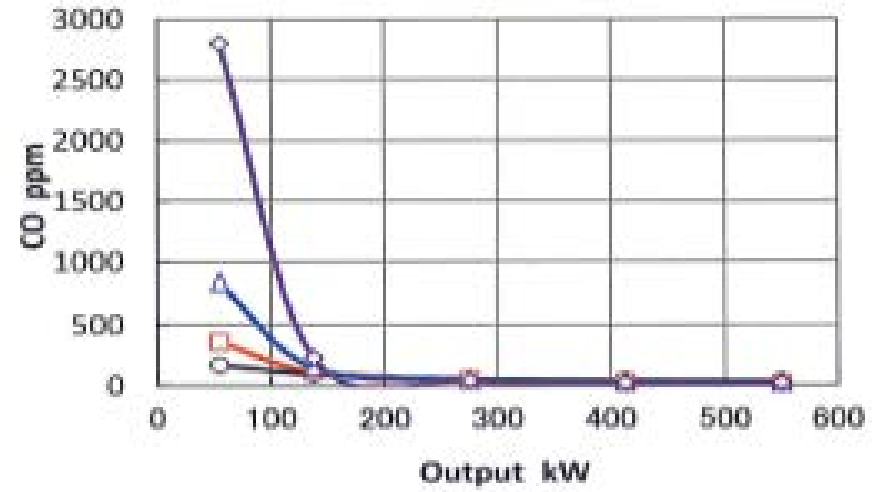
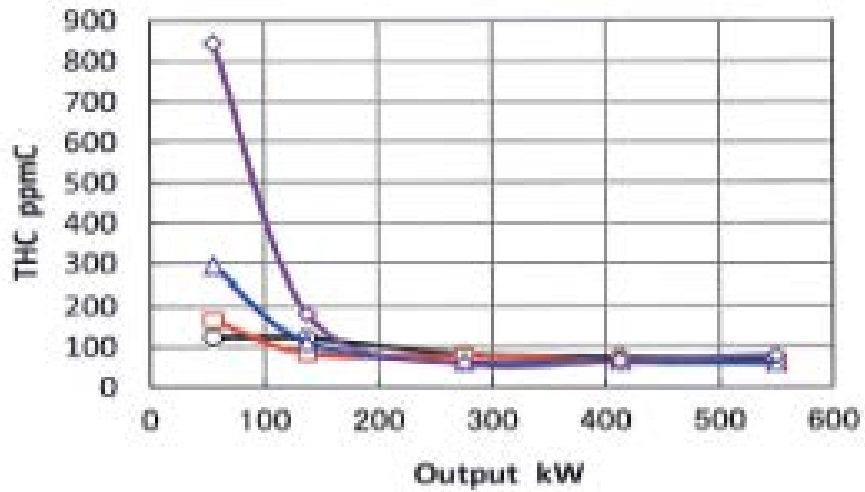
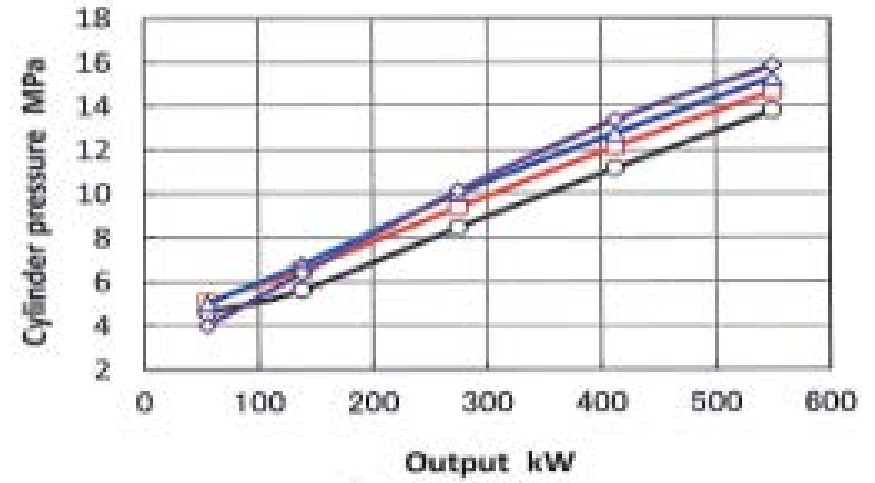
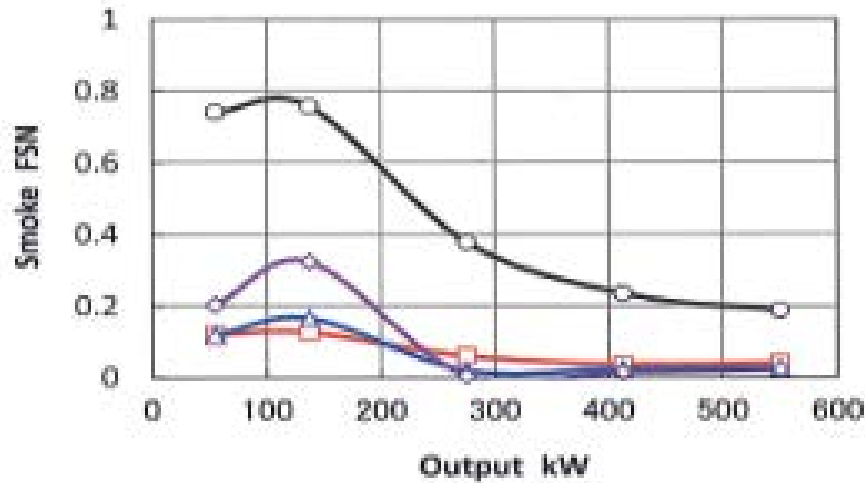
エンジン試験結果(1) NOx・燃費率トレードオフ改善

Date: 2015/2/16~
Test bench: T-5
Engine type: 6EY18
Bore: $\phi 180$
Stroke: 280
Engine output: 550kW
Engine speed: 900min⁻¹

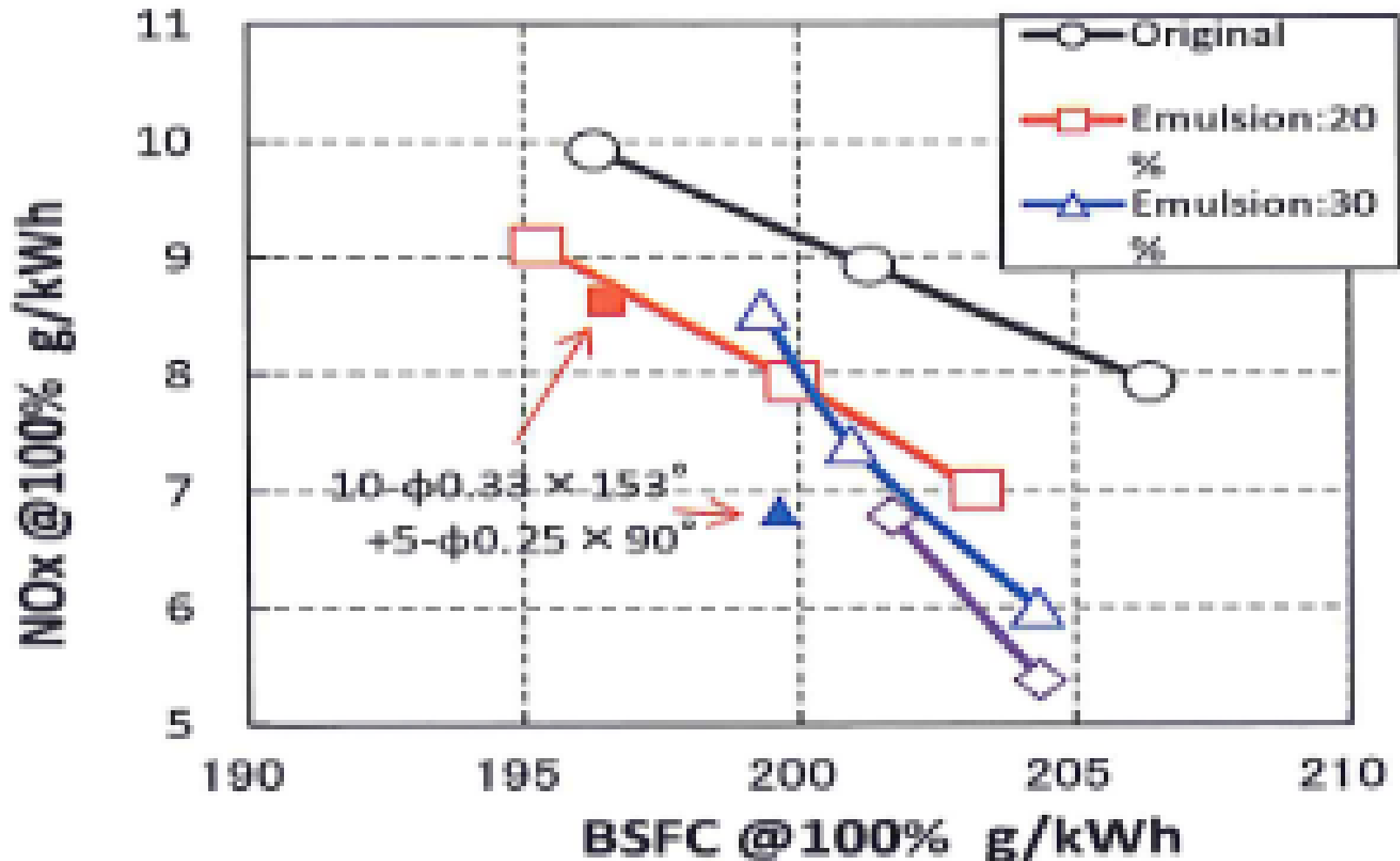
Injection timing: FIC6deg.bTDC
Dynamo: TOKYO PLANT P-55A
Exhaust analyzer: HORIBA MEXA-1600
Smoke meter: AVL 415S
IMO2 Nox limit: 9.20g/kWh



エンジン試験結果(2) スモークの大幅低減

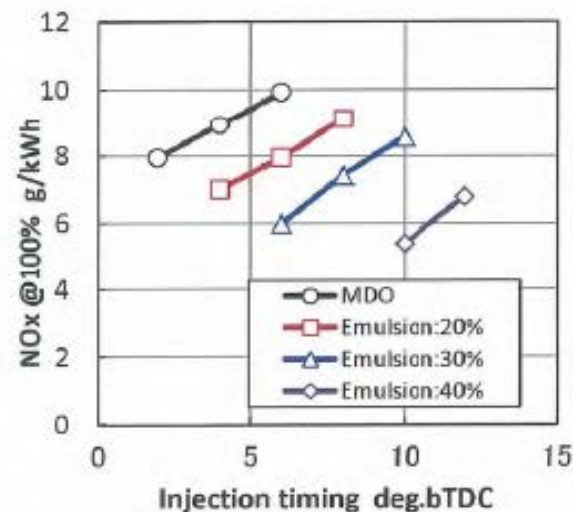
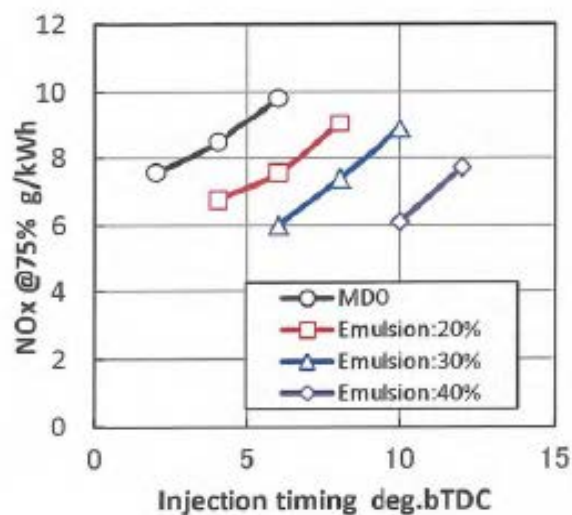
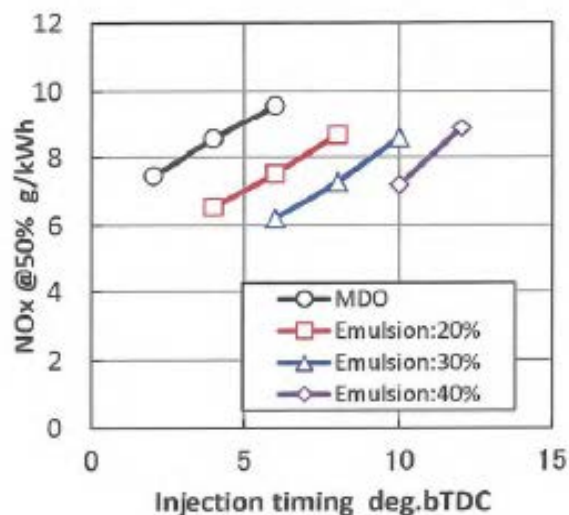
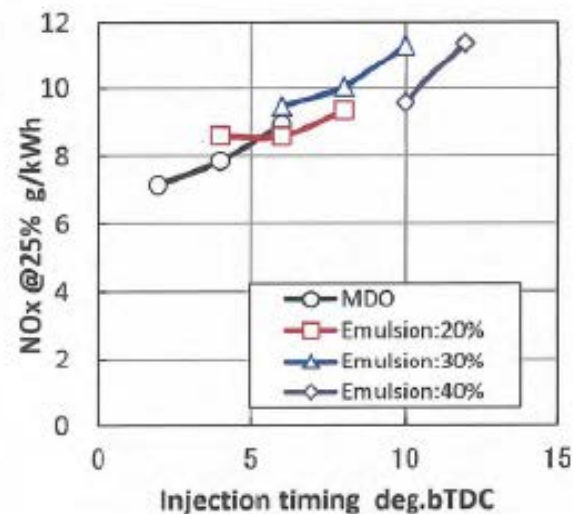
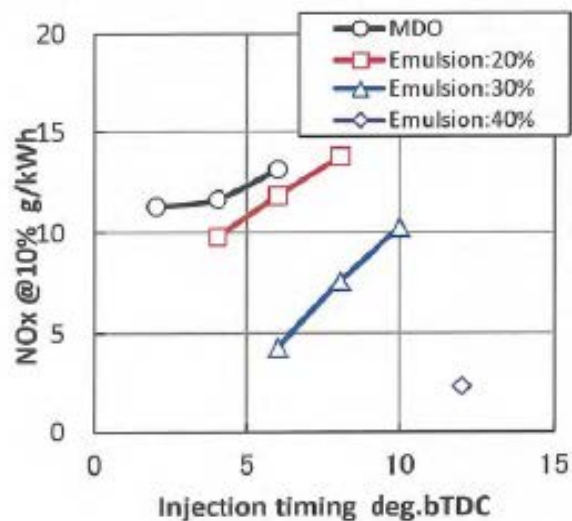


エンジン試験結果(3)水添加率増加時の燃費悪化 ⇒ 着火性改善の必要性を示唆



エンジン試験結果(4)水添加率増加時のNOx削減

Date: 2015/2/16 ~ 2015/02/27
Test bench: T-5
Engine type: 6EY18
Bore: $\phi 180$
Stroke: 280
Engine output: 550kW
Engine speed: 900min⁻¹
Dynamo: TOKYO PLANT P-55A
Exhaust analyzer: HORIBA MEXA-1600
Smoke meter: AVL 415S
IMO2 Nox limit: 9.20g/kWh



4. まとめ

1) 基礎燃焼試験結果

- ① NO_xの大幅低減へ向けての論理付け
- ② エマルジョン燃料の燃焼改善の検証：後燃えの改善
- ③ 多量水エマルジョンによるNO_xの一桁削減実現

2) エマルジョン適用エンジン試験結果

- ① 水添加率20%において、NO_x・燃費率のトレードオフ改善
- ② スモークの大幅低減
- ③ 水添加率30%、40%での着火性確保の重要性
を明確にして、パイロット噴射等燃料噴射系の最適化
の必要性を確認

3) エマルジョンの性状安定性を確認



本研究開発は、株式会社マリタイムイノベーションジャパン、ナノフュエル株式会社、一般財団法人日本海事協会との共同研究体制により実施すると共に、同協会の「業界要望による共同研究スキーム」による支援を受けて実施しました。