

DUAL FUELSエンジン(DFエンジン)における 燃焼性向上に向けた取り組み

Contents

発表概要

序論

研究背景/プラズマ支援燃焼の概要/
先行研究/各エンジンの特徴/
現在の課題

実験方法

実験装置/実験条件

実験結果と考察

軽油噴射時期の進角化実験結果/
過給運転実験結果

まとめ

実験結果まとめ/今後の課題

Contents

発表概要

序論

研究背景/プラズマ支援燃焼の概要/
先行研究/各エンジンの特徴/
現在の課題

実験方法

実験装置/実験条件

実験結果と考察

軽油噴射時期の進角化実験結果/
過給運転実験結果

まとめ

実験結果まとめ/今後の課題

研究背景

- 国際海事機関によって施行されたMARPOL条約
NOx、SOx、PMなどの有害物質に対する厳しい排出制限
- 従来の対策として、尿素SCRシステムや排気再循環(EGR)システムなどが挙げられるが、新たな専用のスペースやコストが問題となる
→ 燃焼改善効果が期待できるプラズマ支援燃焼に着目



図1 SCRシステム

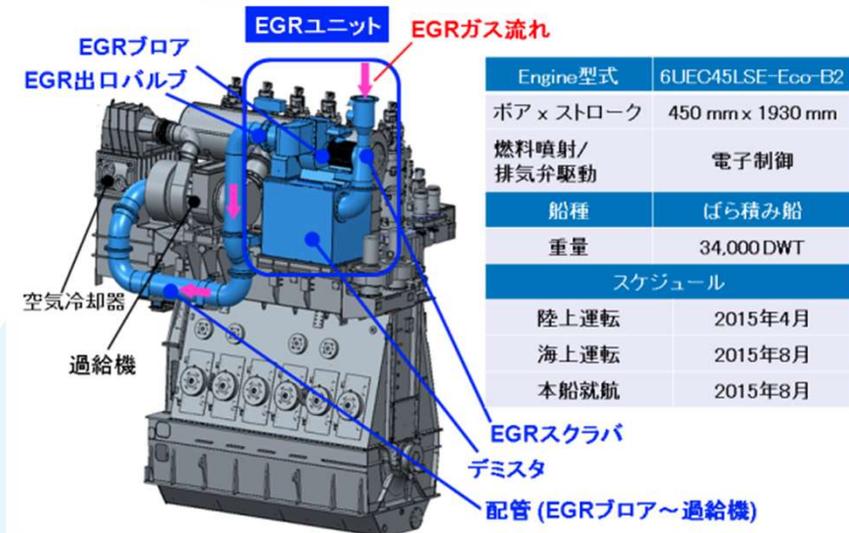


図2 EGRシステム

※三菱重工技報 Vol.53 No.2 (2016)より引用

プラズマ支援燃焼の概要

- 燃料雰囲気中の中性分子を、不対電子を持つ化学反応性の高いラジカル状態に置くことで反応性を高める
- 電極をシリンダ内などに取り付ける構造
→追加のコストやスペースが抑えられ、既存のエンジンにレトロフィットも容易。



図3 電極を取り付けた様子

当研究室の先行研究

廣澤・都築の研究

- ディーゼル機関にプラズマ支援燃焼を適応
→ 燃焼改善効果を得られることを示唆

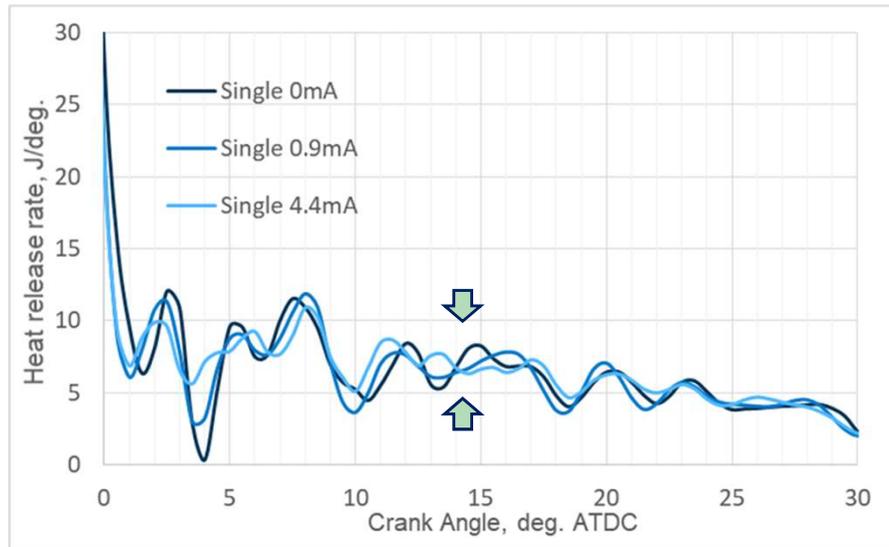


図5 熱発生率の推移

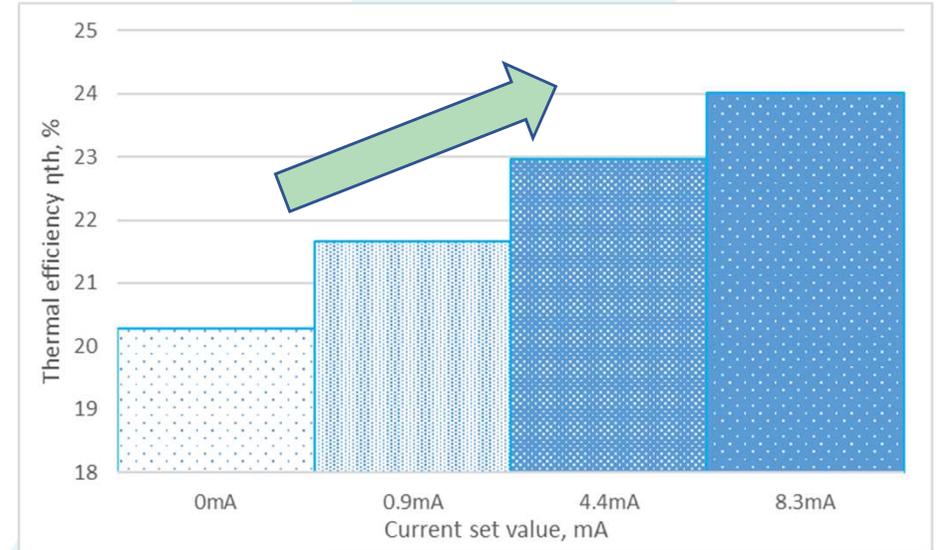


図6 熱効率の推移

卒業研究

- 水冷横型単気筒4サイクルディーゼルエンジンに天然ガスを添加
→ 二元燃料 (DF) 状態にて連続運転を可能に

ディーゼルエンジンとガスエンジン

- ディーゼルエンジン
 - ・燃料はシリンダー内に**直接噴射**
 - ・燃料を**自己着火**させて燃焼を行う。
- ガスエンジン
 - ・燃料は空気と混ぜ、**混合気**として吸気時に吸入
 - ・天然ガスは**自己着火しない**ため、スパークプラグや軽油を着火剤として使用
→今実験では**軽油**を採用

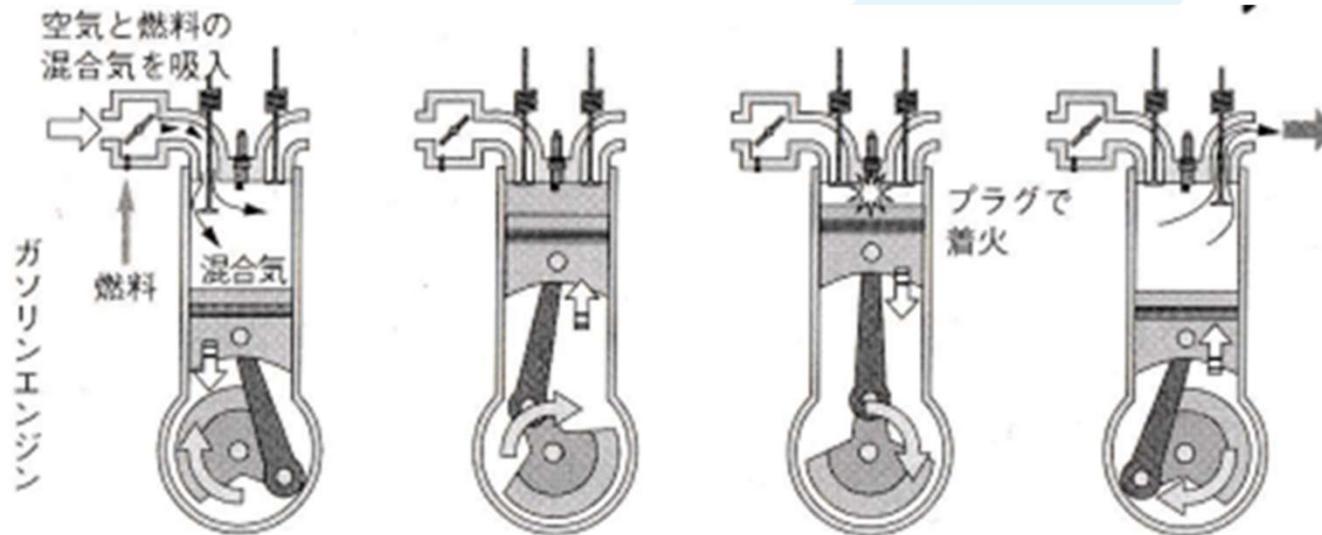


図7 ガスエンジンの燃焼

現在の課題

課題

- HC（未燃燃料）の値が大幅に増加しており、**燃焼性に問題あり**
- 軽油の希薄化によって、**天然ガス混合気体の点火と燃焼促進効果が低下したことが原因**

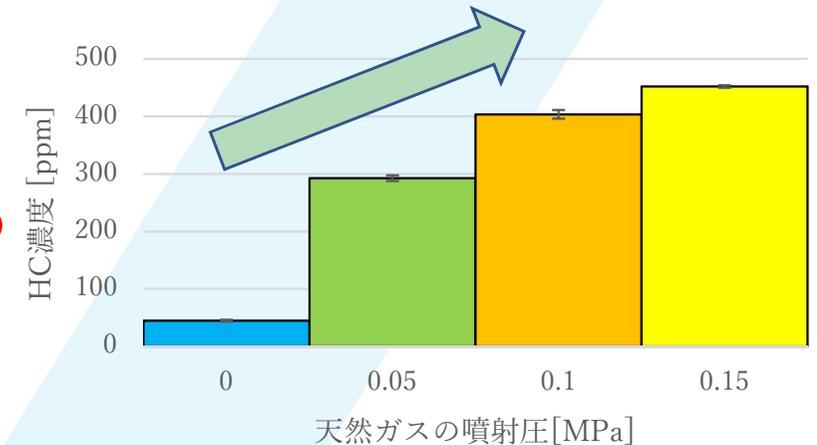


図8 天然ガスの推移

対応策

- 軽油の噴射時期の進角化
→ **軽油噴霧の分散を促し**、天然ガス混合気の点火と燃焼促進効果を高める
- 過給運転
→ **より多くの酸素を取り込む**ことで、燃焼効率を上げる

Contents

発表概要

序論

研究背景/プラズマ支援燃焼の概要/
先行研究/各エンジンの特徴/
現在の課題

実験方法

実験装置/実験条件

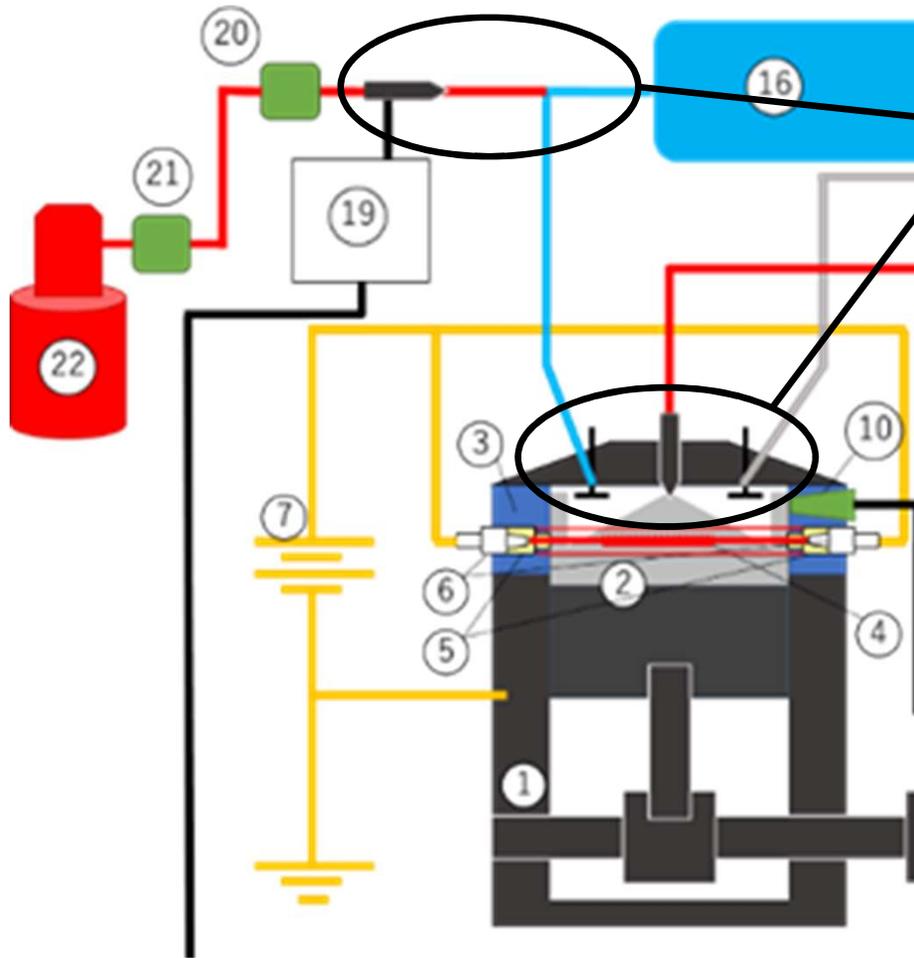
実験結果と考察

軽油噴射時期の進角化実験結果/
過給運転実験結果

まとめ

実験結果まとめ/今後の課題

実験装置（機関）



燃料噴射方式

軽油：直接噴射式 ⇒

天然ガス：ポート噴射

吸気工程

(排気バルブ：閉)

形式：水冷横型単気筒

4サイクルディーゼルエンジン

ボア×ストローク[mm]: 92×96

排気量: 0.639L

圧縮比: 11.39(電極設置用改造後)

連続定格出力: 8.1kW/2400rpm

(カタログ値)

最大出力: 9.2kW/2400rpm

(カタログ値)

噴射ポンプ: コモンレール方式

噴射ノズル: 4孔式

開弁圧: 16.7MPa

閉弁圧: 13.36MPa (開弁圧の80%)

実験装置（電極）

□ 陽極：ねじ棒 M3×135[mm]



□ 陰極：インコネルチューブ
外径 10[mm]
内径 8[mm]



図9 取り付けた電極



図10 電極を取り付けた様子

実験条件

表 1 軽油噴射時期の進角化実験

実験条件		1	2	3	4	5	6	7
機関回転数	rpm	2000						
負荷	kW	1.5						
吸気圧力	kPa	自然吸気						
天然ガス噴射タイミング	-	ATDC38.5°						
軽油噴射タイミング	-	BTDC14°	BTDC14.5°	BTDC15°	BTDC15.5°	BTDC16°	BTDC16.5°	BTDC17°
天然ガス噴射圧力、噴射時間	MPa、ms	0.1、3						

・計測項目

機関：機関回転数[rpm]、制動荷重[kg]、吸気温度[°C]、排気温度[°C]
筒内圧力履歴[MPa]、燃料圧力履歴[MPa]、燃料消費量[ml/min]

吸気：気温[°C]、大気圧[hPa]、湿度[%]、吸気圧力[kPa]、
吸気オリフィス差圧[kPa]

排気：HC[ppm]、CO[ppm]、CO₂[%]、
NO[ppm]、NO₂[ppm]、NO_x[ppm]、O₂[%]、

任意のクランク角度における熱発生率

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa-1} \left(\kappa P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) \cdot \cdot \cdot \cdot (3.1)$$

Q: 発生熱量 [J]

θ : クランク角 [deg.]

κ : 比熱比 1.4 [-] P: 筒内圧 [Pa]

V: シリンダー容積 [m³]

実験条件

表2 過給運転実験

実験条件		1	2	3	4	5
機関回転数	rpm	2000				
負荷	kW	1.5				
吸気圧力	kPa	自然吸気	0.5	1	1.5	1.8
天然ガス噴射タイミング	-	ATDC38.5°				
軽油噴射タイミング	-	BTDC15.5°				
天然ガス噴射圧力、噴射時間	MPa、ms	0.1、3				

・計測項目

機関：機関回転数[rpm]、制動荷重[kg]、吸気温度[°C]、排気温度[°C]
筒内圧力履歴[MPa]、燃料圧力履歴[MPa]、燃料消費量[ml/min]

吸気：気温[°C]、大気圧[hPa]、湿度[%]、吸気圧力[kPa]、
吸気オリフィス差圧[kPa]

排気：HC[ppm]、CO[ppm]、CO₂[%]、
NO[ppm]、NO₂[ppm]、NO_x[ppm]、O₂[%]、

任意のクランク角度における熱発生率

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa-1} \left(\kappa P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) \cdot \cdot \cdot \cdot (3.1)$$

Q: 発生熱量 [J]

θ : クランク角 [deg.]

κ : 比熱比 1.4 [-] P: 筒内圧 [Pa]

V: シリンダー容積 [m³]

Contents

発表概要

序論

研究背景/プラズマ支援燃焼の概要/
先行研究/各エンジンの特徴/
現在の課題

実験方法

実験装置/実験条件

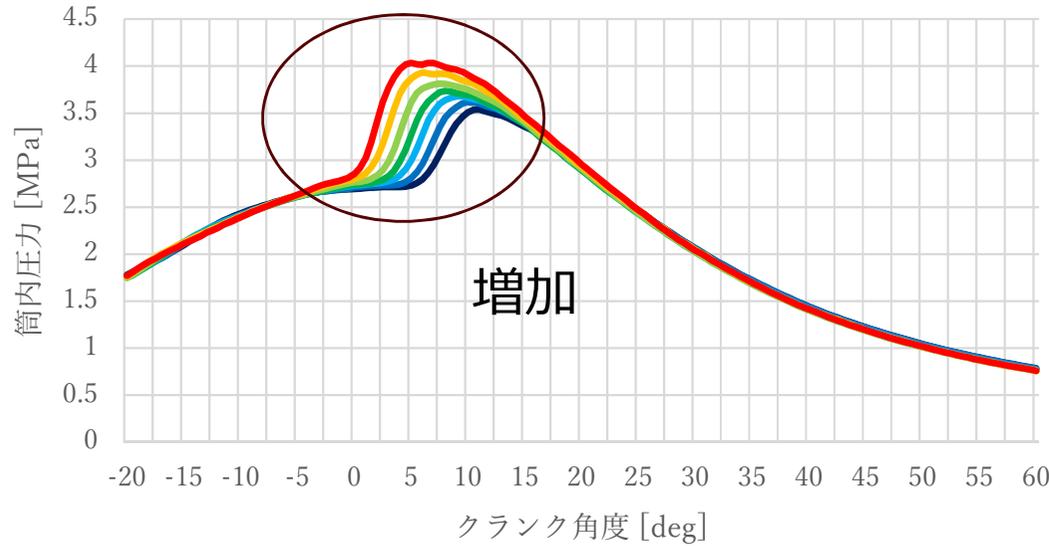
実験結果と考察

軽油噴射時期の進角化実験結果/
過給運転実験結果

まとめ

実験結果まとめ/今後の課題

筒内圧力、熱発生率



— BTDC 14° — BTDC 14.5° — BTDC 15° — BTDC 15.5°
— BTDC 16° — BTDC 16.5° — BTDC 17°

図11 筒内圧力履歴

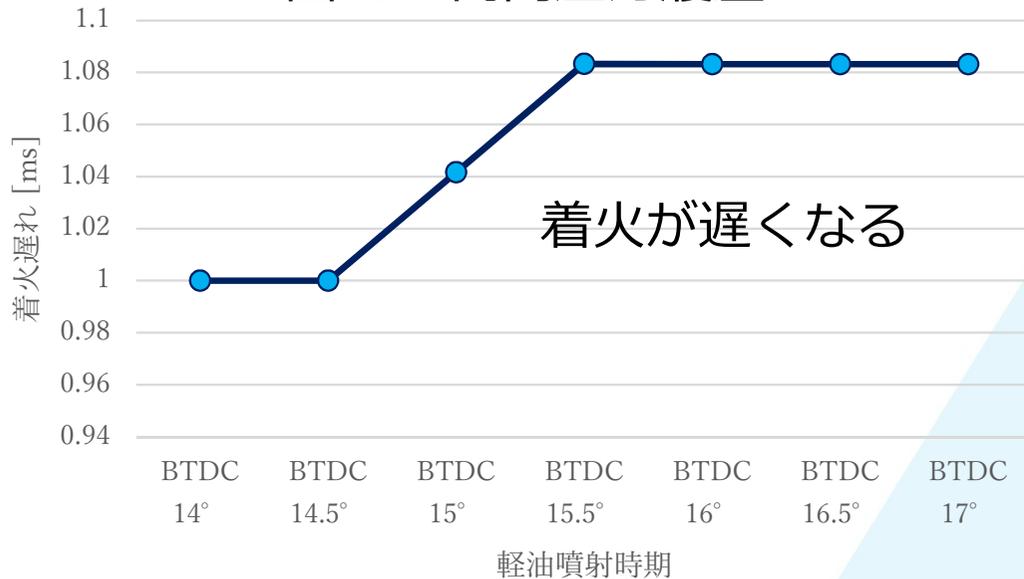
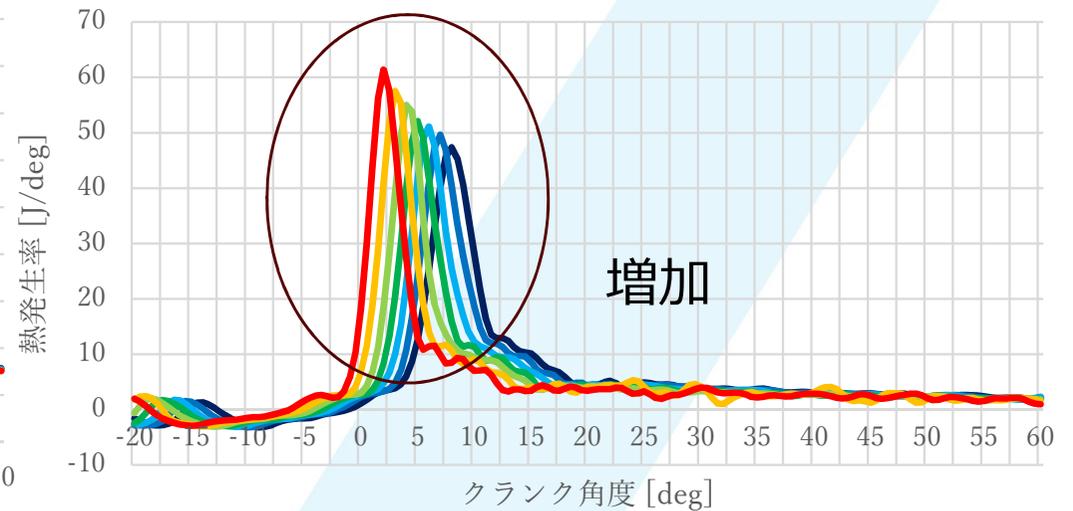


図13 着火遅れの推移



— BTDC 14° — BTDC 14.5° — BTDC 15° — BTDC 15.5°
— BTDC 16° — BTDC 16.5° — BTDC 17°

図12 熱発生率履歴

- 筒内圧力、熱発生率ともに **最大値が大きくなった**
- 着火遅れは噴射の進角化に伴い **遅くなった**



- 軽油の分散が促された**ことで天然ガス混合気の点火と燃焼促進効果が上昇し、燃焼性が向上した。

質量燃焼割合、熱効率

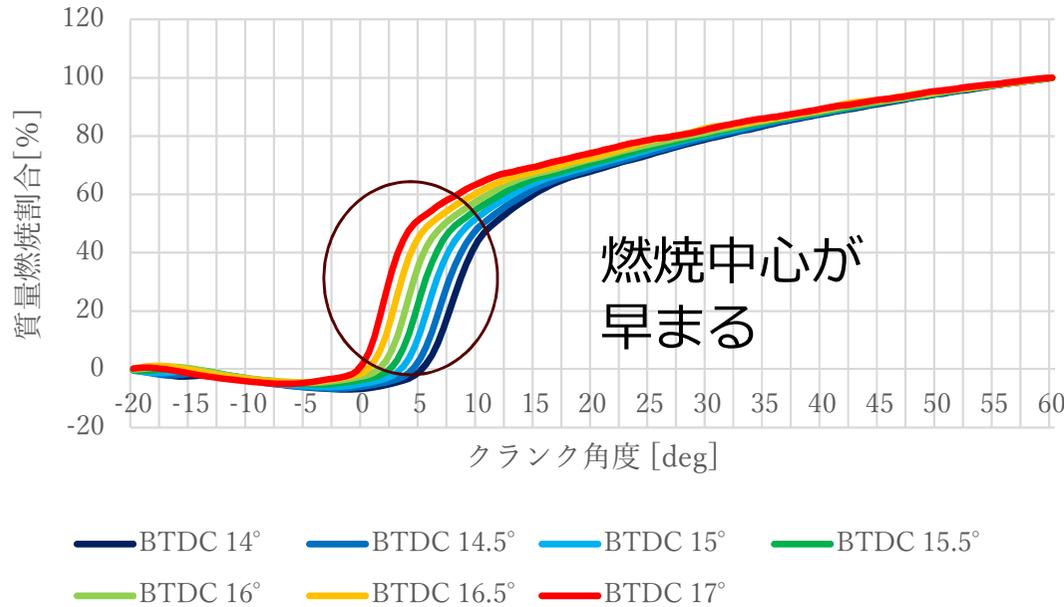


図14 質量燃焼割合

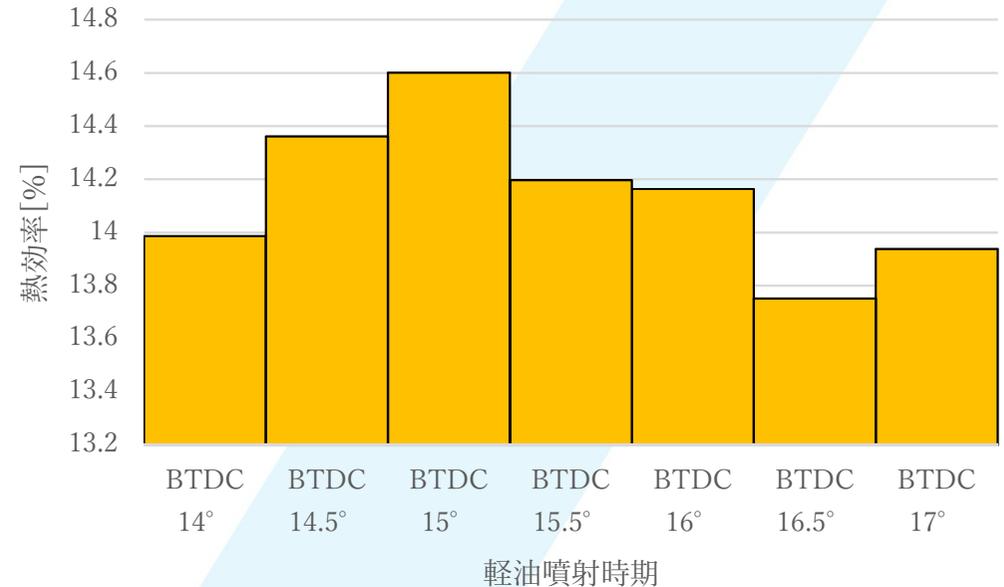


図15 熱効率

表3 燃料消費量

	BTDC 14°	BTDC 14.5°	BTDC 15°	BTDC 15.5°	BTDC 16°	BTDC 16.5°	BTDC 17°
軽油[ml/min]	7	6.5	6.25	6.75	6.75	7.25	7
天然ガス[ml/min]	9.39	9.45	9.43	9.39	9.43	9.43	9.45

- 燃焼開始が早まることで、燃焼中心も早まり、**緩やかな燃焼**が起きている。



- 燃焼重心が上死点に近づいた**ことで要求火炎伝播距離が短くなったことや、ピストン膨張による気流の影響が減少した。

- 熱効率は**傾向が見られず**。

- 最大でも1ml/minの差であるため、引き続き調査をする必要がある。

HC、残留酸素濃度

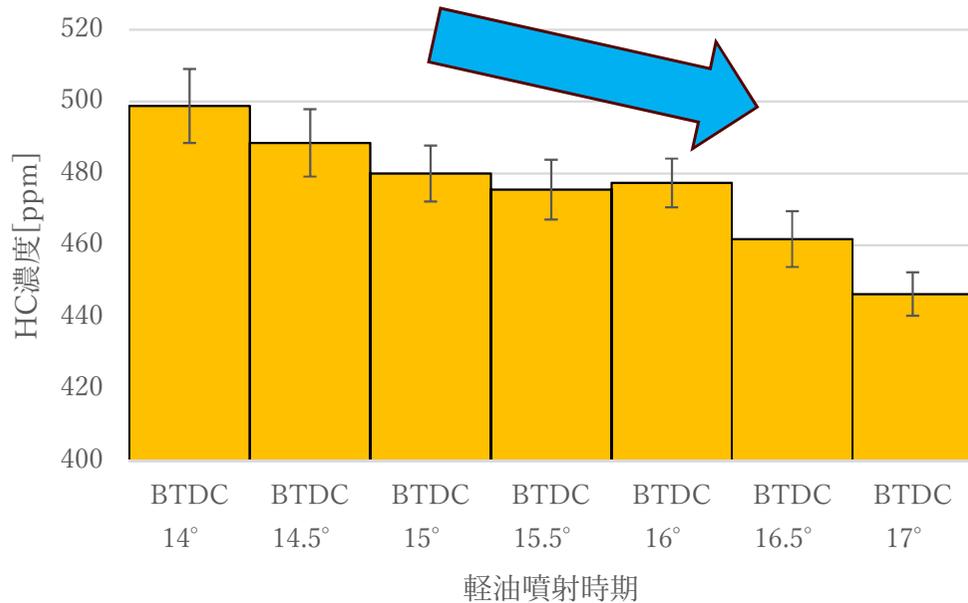


図16 HC濃度の推移

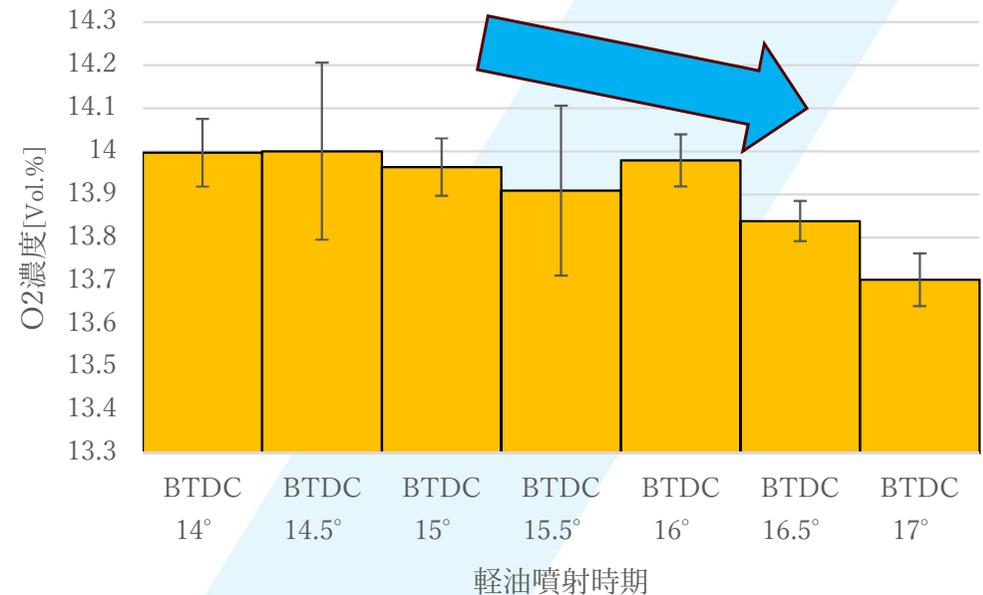


図17 残留酸素濃度の推移

- 軽油の進角化に伴い、HCの値が最大で約10%減少
- 残留酸素濃度も減少



- 燃烧性の向上が示唆できる

CO₂、CO濃度

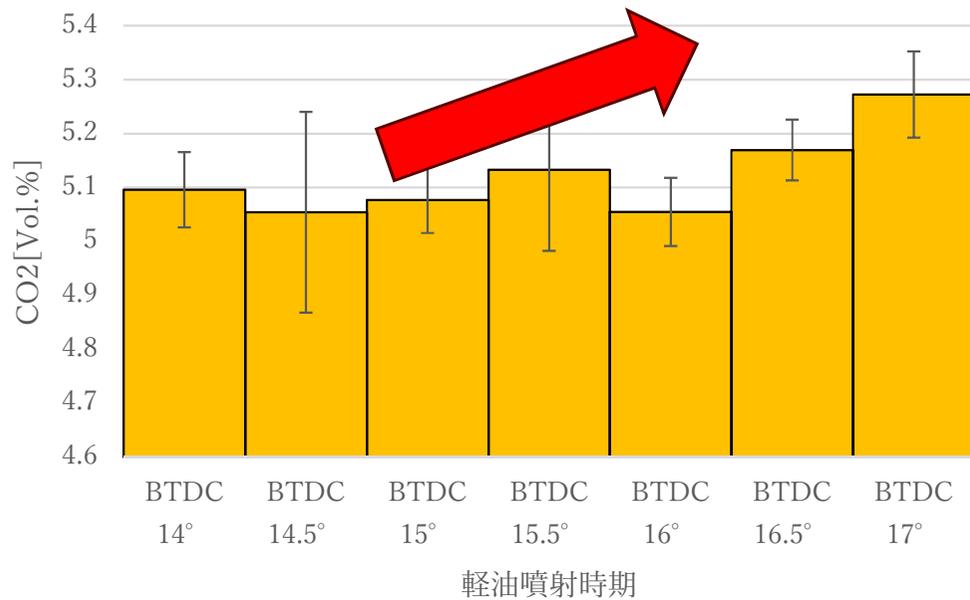


図18 CO₂濃度の推移

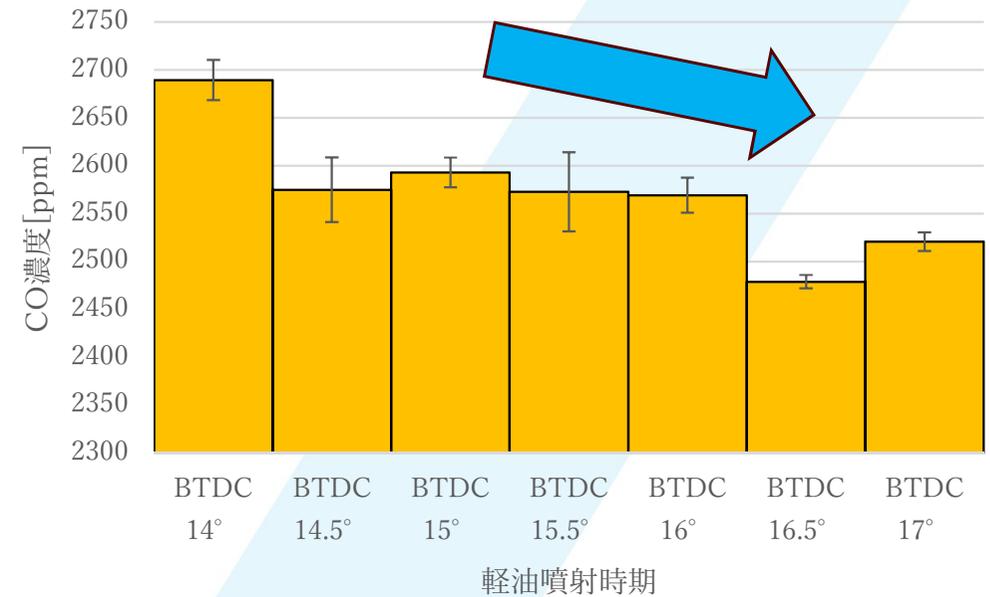


図19 CO濃度の推移

- CO₂濃度は増加傾向
- CO濃度は減少傾向



- 完全燃焼が促進された
- 残留酸素濃度の推移と一致

NO_x、NO₂濃度、排ガス温度

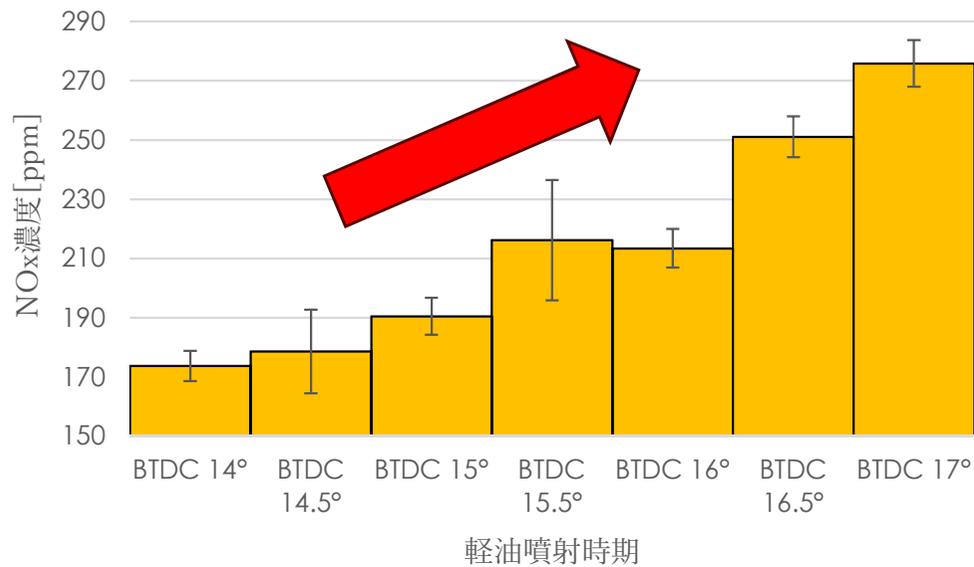


図20 NO_x濃度の推移

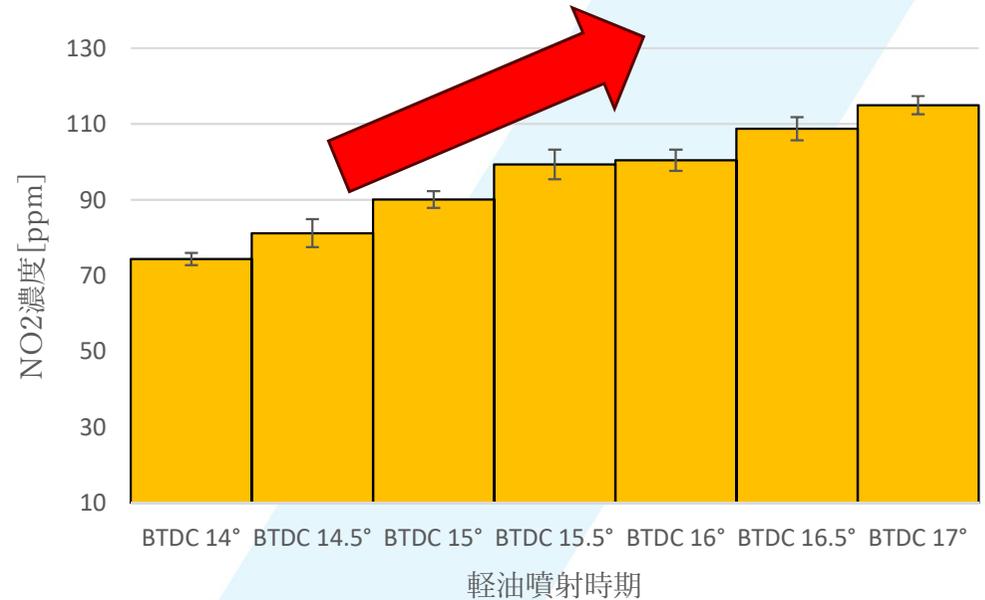


図21 NO₂濃度の推移

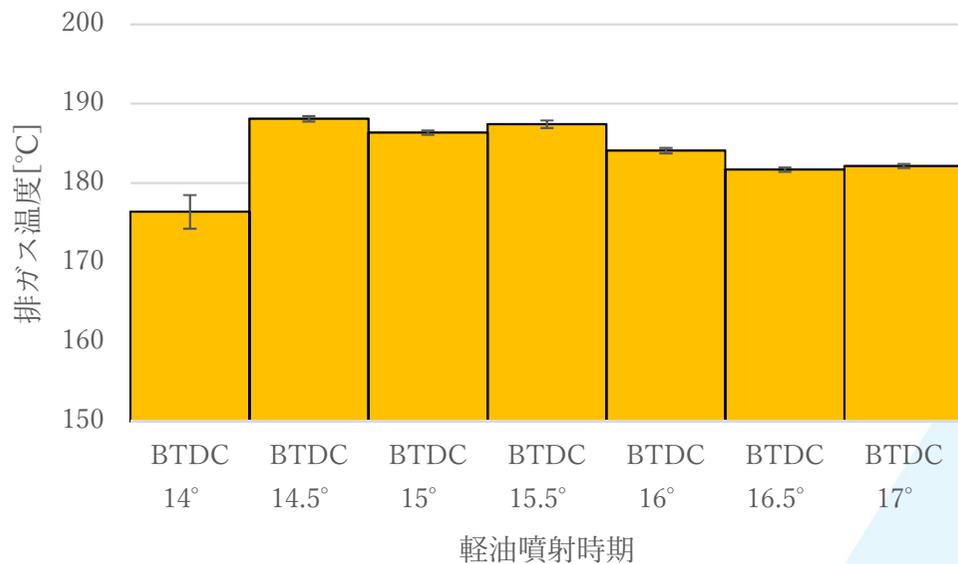


図22 排ガス温度の推移

- NO_x、NO₂濃度は増加傾向
- 排ガス温度は傾向が見られず

- 燃焼による発熱量が増えたことによる **サーマルNO_x**が増加
- 燃焼が早まり、緩やかな燃焼が起こったために排ガス温度はあまり変化せず？

Contents

発表概要

序論

研究背景/プラズマ支援燃焼の概要/
先行研究/各エンジンの特徴/
現在の課題

実験方法

実験装置/実験条件

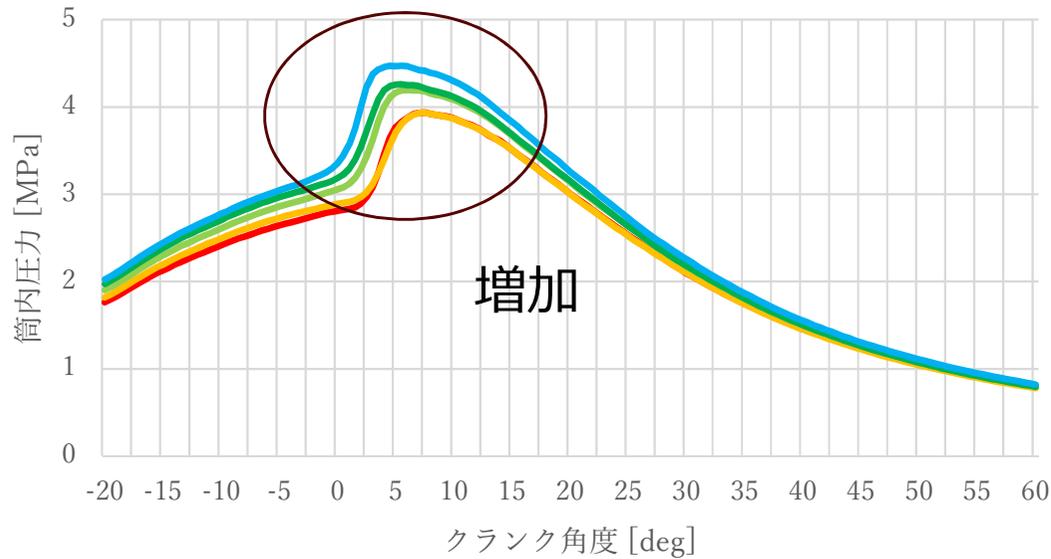
実験結果と考察

軽油噴射時期の進角化実験結果/
過給運転実験結果

まとめ

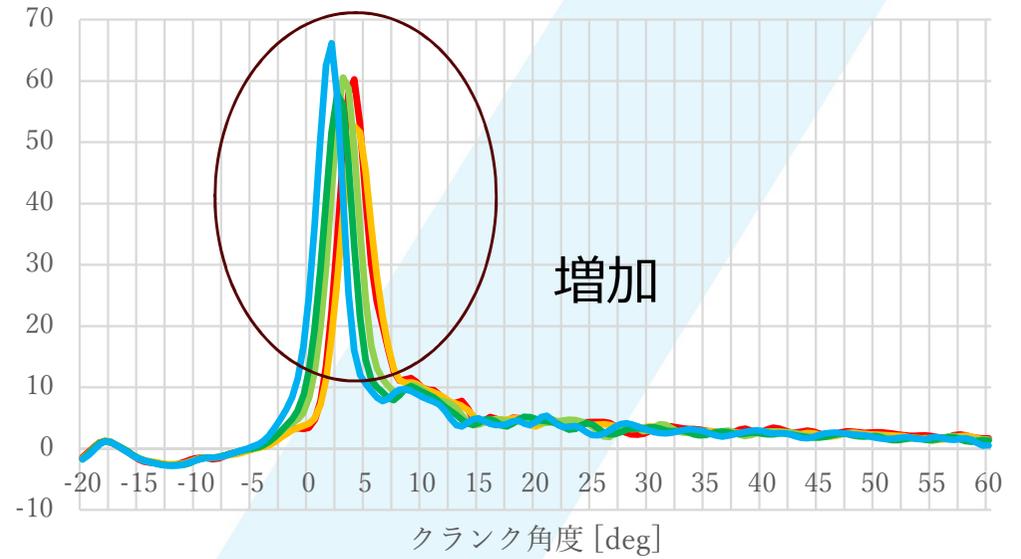
実験結果まとめ/今後の課題

筒内圧力と熱発生率



— 0 kPa — 0.5 kPa — 1.0 kPa — 1.5 kPa — 1.8 kPa

図23 筒内圧力履歴



— 0 kPa — 0.5 kPa — 1.0 kPa — 1.5 kPa — 1.8 kPa

図24 熱発生率履歴

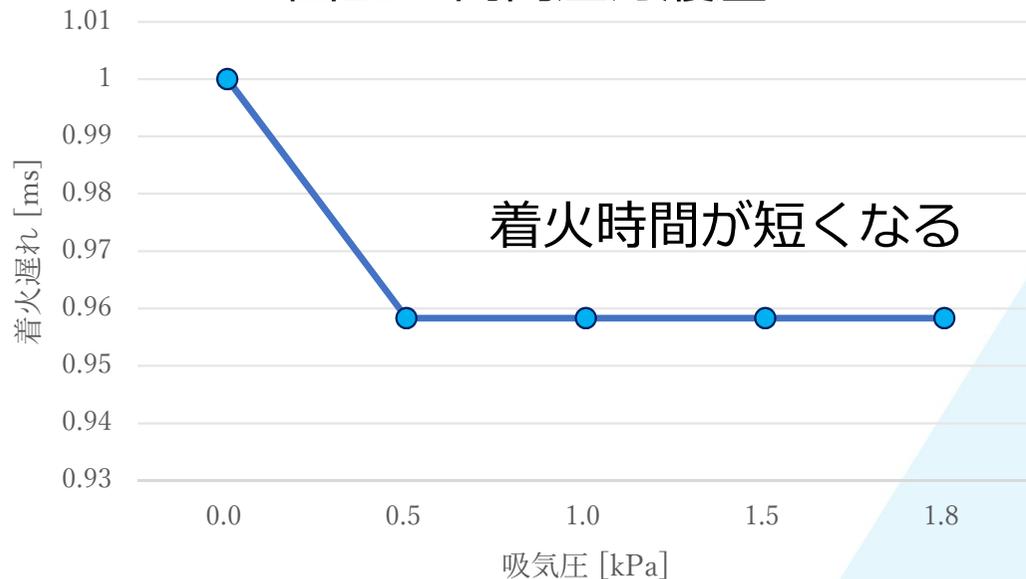


図25 着火遅れの推移

- 筒内圧力、熱発生率ともに
最大値が大きくなった
- 着火遅れは吸気圧の増加に伴い
短くなった



- 吸気圧の増加により、吸気量が増加した
- 着火のタイミングが早まり、天然ガス混合気の点火と燃焼促進効果が減少した

質量燃焼割合、熱効率

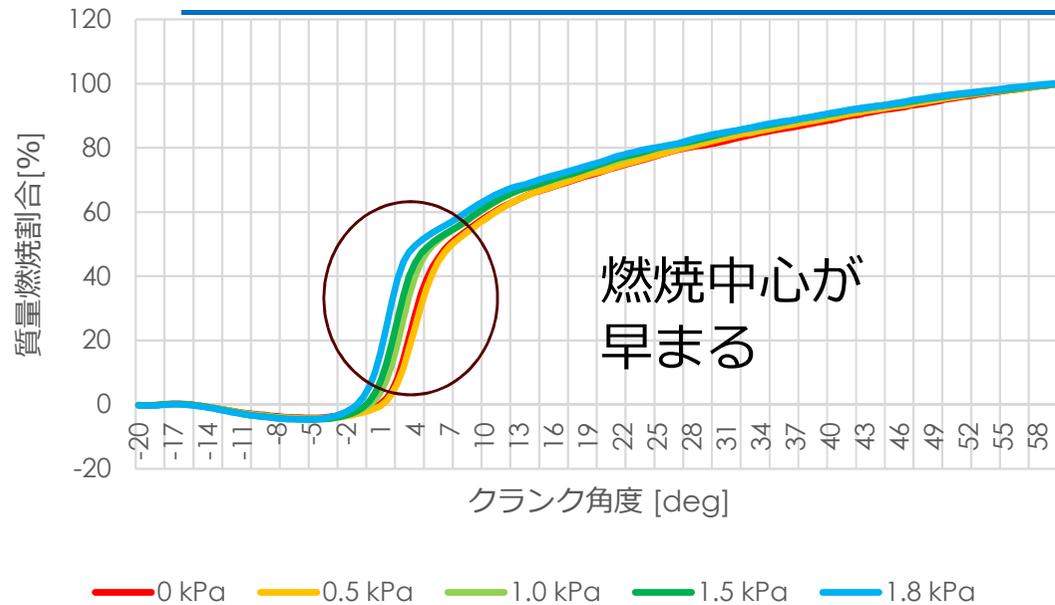


図26 質量燃焼割合

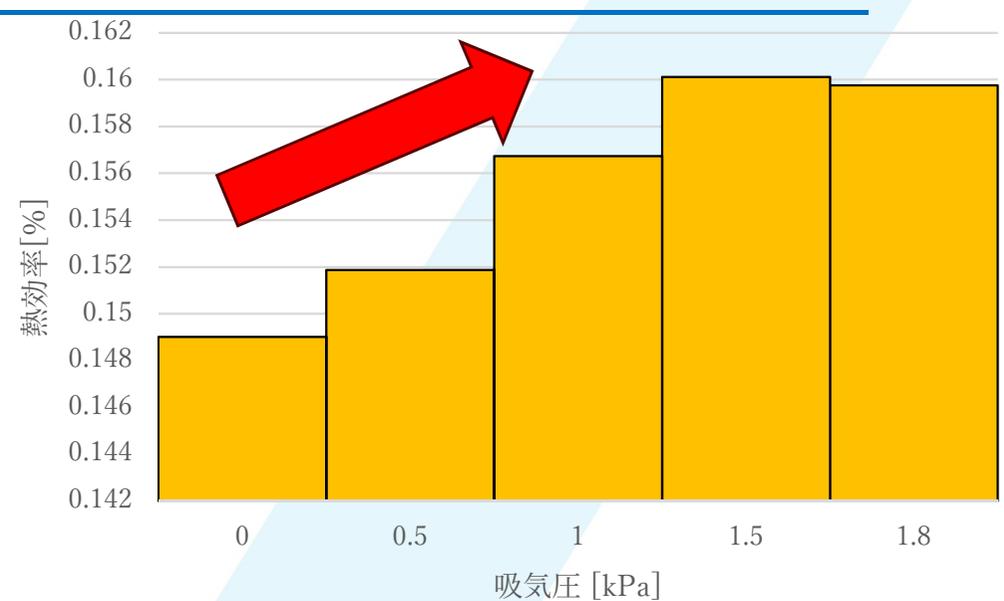


図27 熱効率

表4 燃料消費量

吸気圧[kPa]	0.0	0.5	1.0	1.5	1.8
軽油[ml/min]	5.30	5.50	5.63	5.75	5.75
天然ガス[ml/min]	10.02	9.08	8.85	8.67	8.68

- 燃焼開始が早まることで、燃焼中心も早まり、**緩やかな燃焼**が起きている

- 熱効率は**上昇傾向**



- 燃焼重心が上死点に近づき**、**緩やかな燃焼**が発生

- 添加する天然ガスの量が減少し、**軽油の消費量が上昇したため**、効率が上昇した

HC、残留酸素濃度

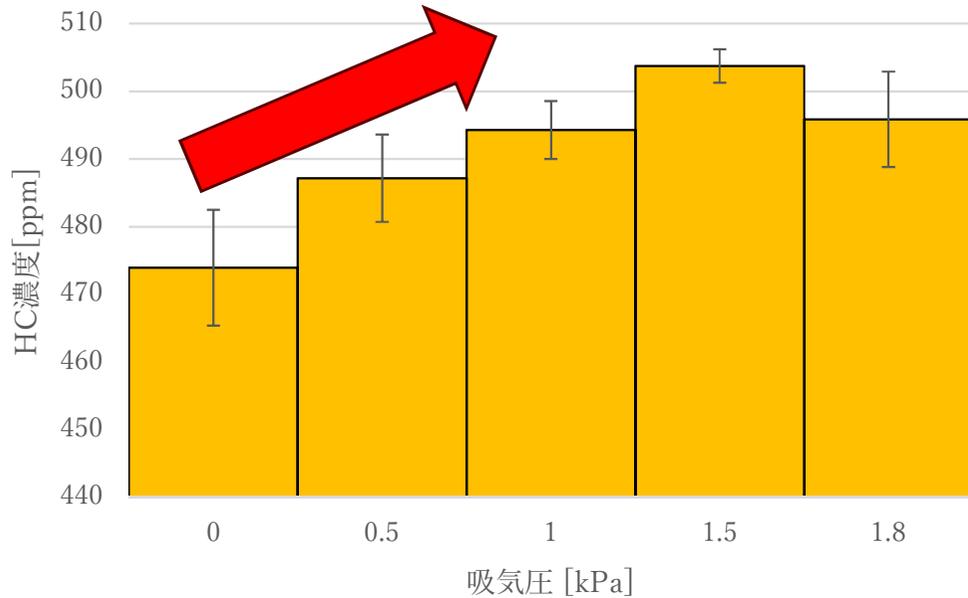


図28 HC濃度の推移

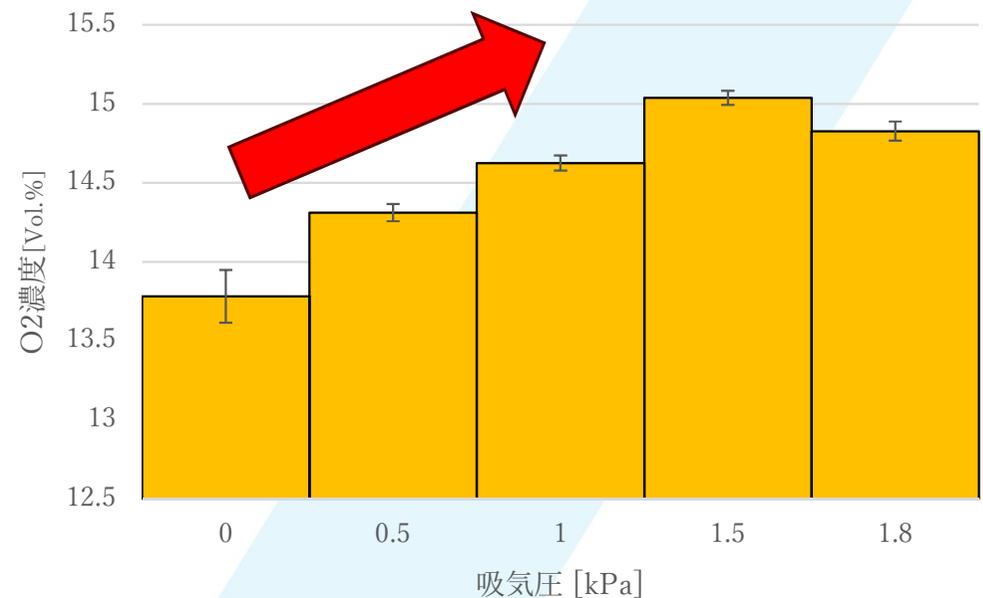
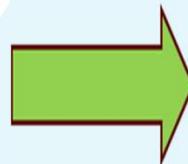


図29 残留酸素濃度の推移

表5 燃料消費量

吸気圧[kPa]	0.0	0.5	1.0	1.5	1.8
当量比	0.028	0.019	0.016	0.014	0.013

- HCの値が最大で約10%増加
- 残留酸素濃度も増加



- 燃烧性の悪化が示唆
- 天然ガスの当量比が減少し
燃烧しずらくなった？

CO₂、CO濃度

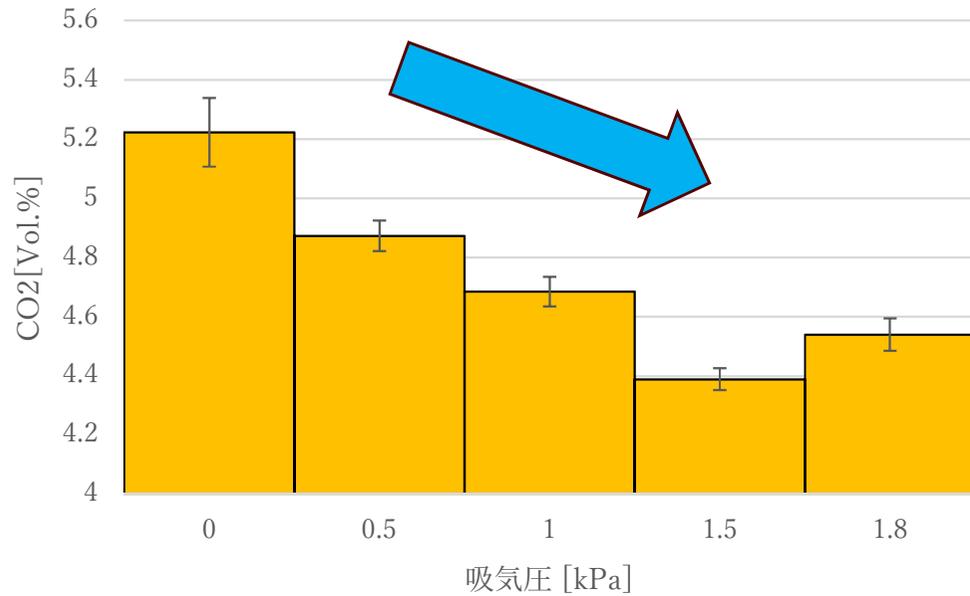


図30 CO₂濃度の推移

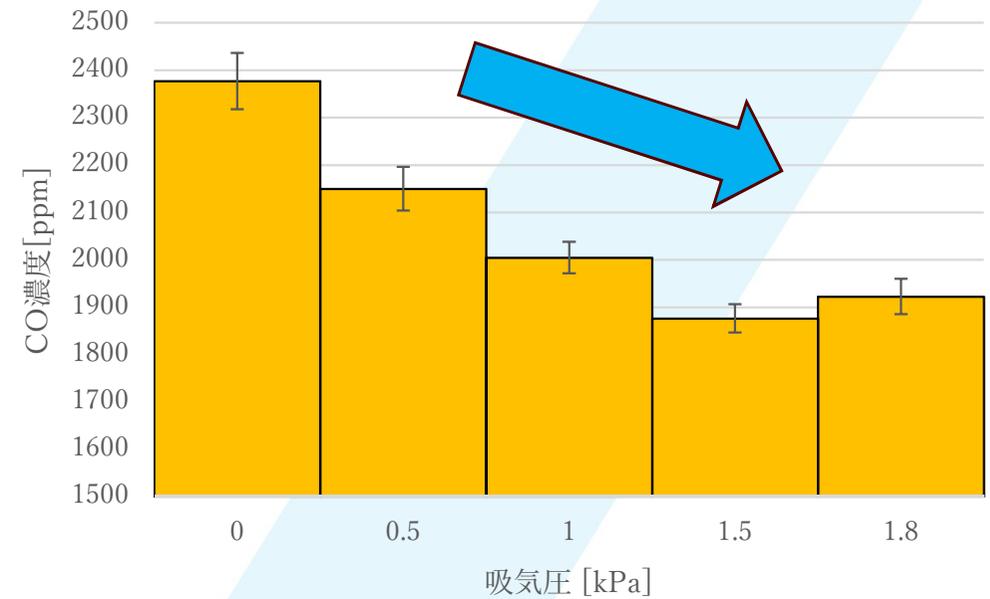
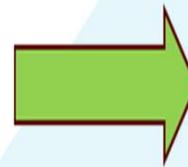


図31 CO濃度の推移

- CO₂濃度、CO濃度ともに減少傾向



- 燃焼性の悪化
- 残留酸素濃度の推移と一致

NO_x、NO₂濃度、排ガス温度

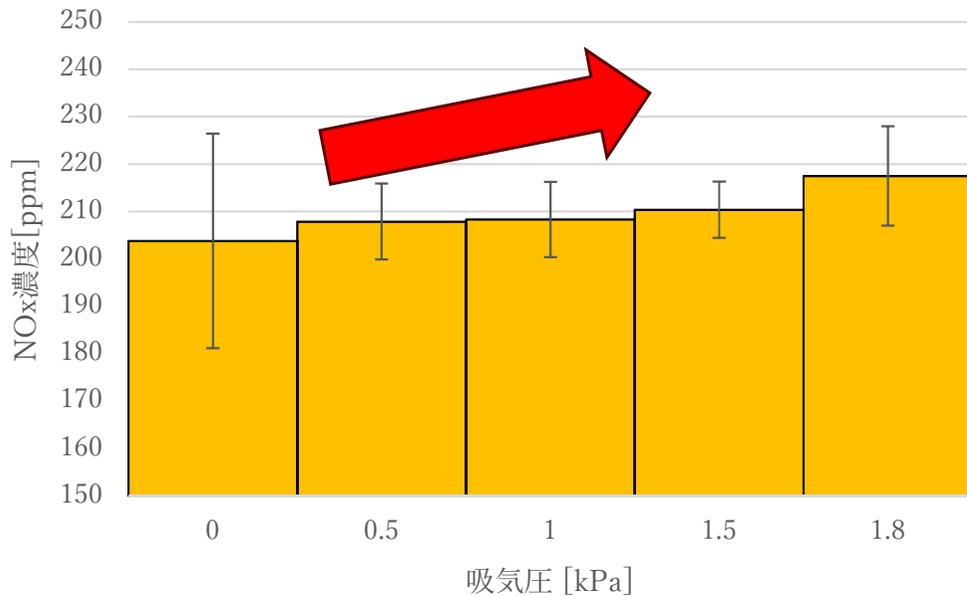


図31 NO_x濃度の推移

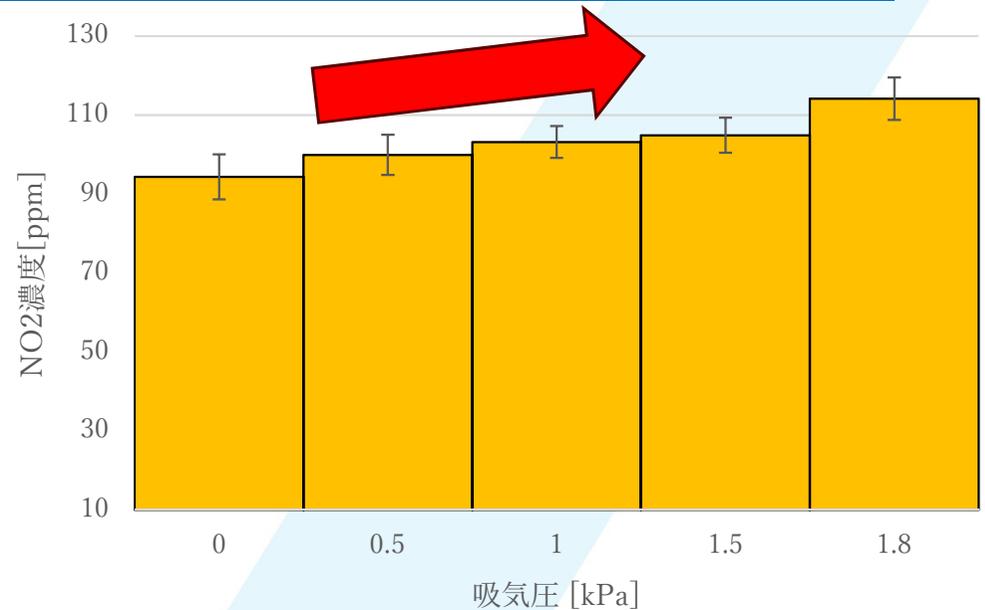


図32 NO₂濃度の推移

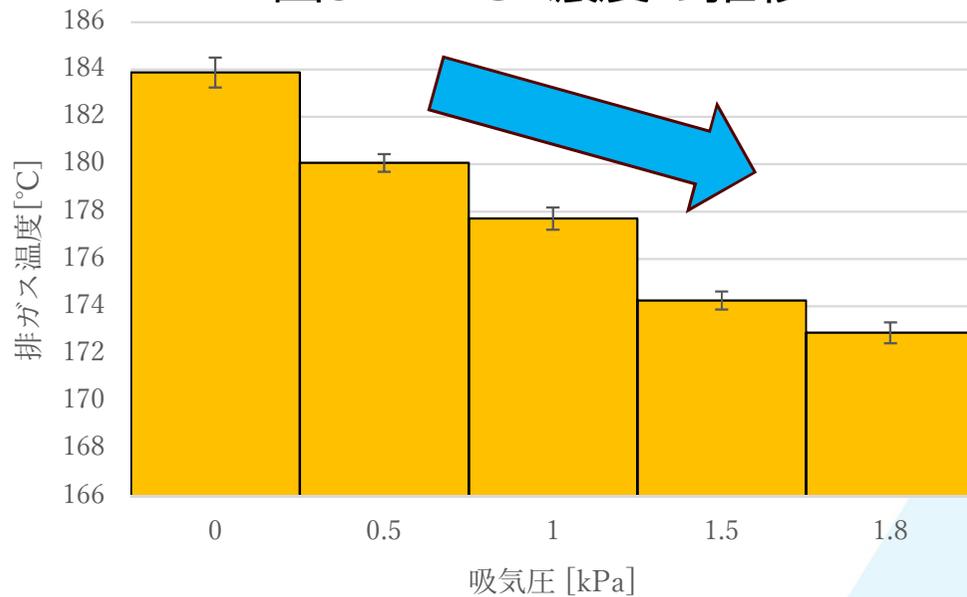
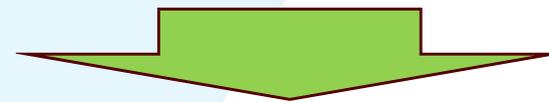


図33 排ガス温度の推移

- NO_x、NO₂濃度は増加傾向
- 排ガス温度は低下傾向



- 天然ガス消費量が減少し、**軽油消費量が増加**したことで、**フューエルNO_x**が増加
- 吸気量が増えたことで、**燃焼温度が低下**ガスが燃えづらくなり、燃焼性が悪化

Contents

発表概要

序論

研究背景/プラズマ支援燃焼の概要/
先行研究/各エンジンの特徴/
現在の課題

実験方法

実験装置/実験条件

実験結果と考察

軽油噴射時期の進角化実験結果/
過給運転実験結果

まとめ

実験結果まとめ/今後の課題

軽油噴射時期の進角化実験結果

- 軽油の進角化に伴い、HCの排出量、残存酸素量が減少し、CO₂の排出量は増加した
→エンジンの燃焼性が向上した
- 着火遅れ期間は、軽油の進角化に伴い遅くなった
→天然ガス混合気の点火と燃焼促進効果が上昇したことや、着火時期が早まり、燃焼重心が上死点に近づいたことが、エンジンの燃焼性向上につながった
- NO_xの数値は増加した。
→燃焼重心が上死点に近づき、燃焼による発熱量が増えたことで、サーマルNO_xが増えた。

過給運転の実験結果

- 吸気圧力の上昇に伴い、HCの排出量、残存酸素量が増加し、CO₂の排出量は減少した。
→エンジンの**燃焼性が悪化した**
- 過給により**燃焼室内での燃焼温度が下がったこと**や、**天然ガスの当量比が減少した**ことが、エンジンの燃焼性悪化につながった。
- 着火遅れ期間は、吸気量の増加に伴い短くなった。
→天然ガス混合気の**点火と燃焼促進効果が減少した**ことが、エンジンの燃焼性悪化につながった
- NO_xの数値は吸気圧の増加に伴い微増した。
→吸気部分に添加される天然ガスの量が減少したことで、**軽油の消費量が上昇し、フューエルNO_xが増加した**

実験用エンジンのバルブタイミング

