

デュアルフューエルエンジンへの プラズマ支援燃焼の適用に向けた 放電現象測定とその運用



神戸大学大学院 海事科学研究科

海事科学専攻マリンエンジニアリングコース

内燃機関工学研究室

山名 馨

Table of contents

01

Introduction

- 1.1 背景
- 1.2 当研究室での先行研究
- 1.3 実験目的

02

Plasma assisted
combustion?

- 2.1 プラズマ支援燃焼の概念
- 2.2 放電電流と電圧の関係
- 2.3 プラズマ支援燃焼内での反応

03

Experimental
procedure

- 3.1 大気圧流れ放電実験
- 3.2 DFエンジン内の放電実験

04

Results
& discussion

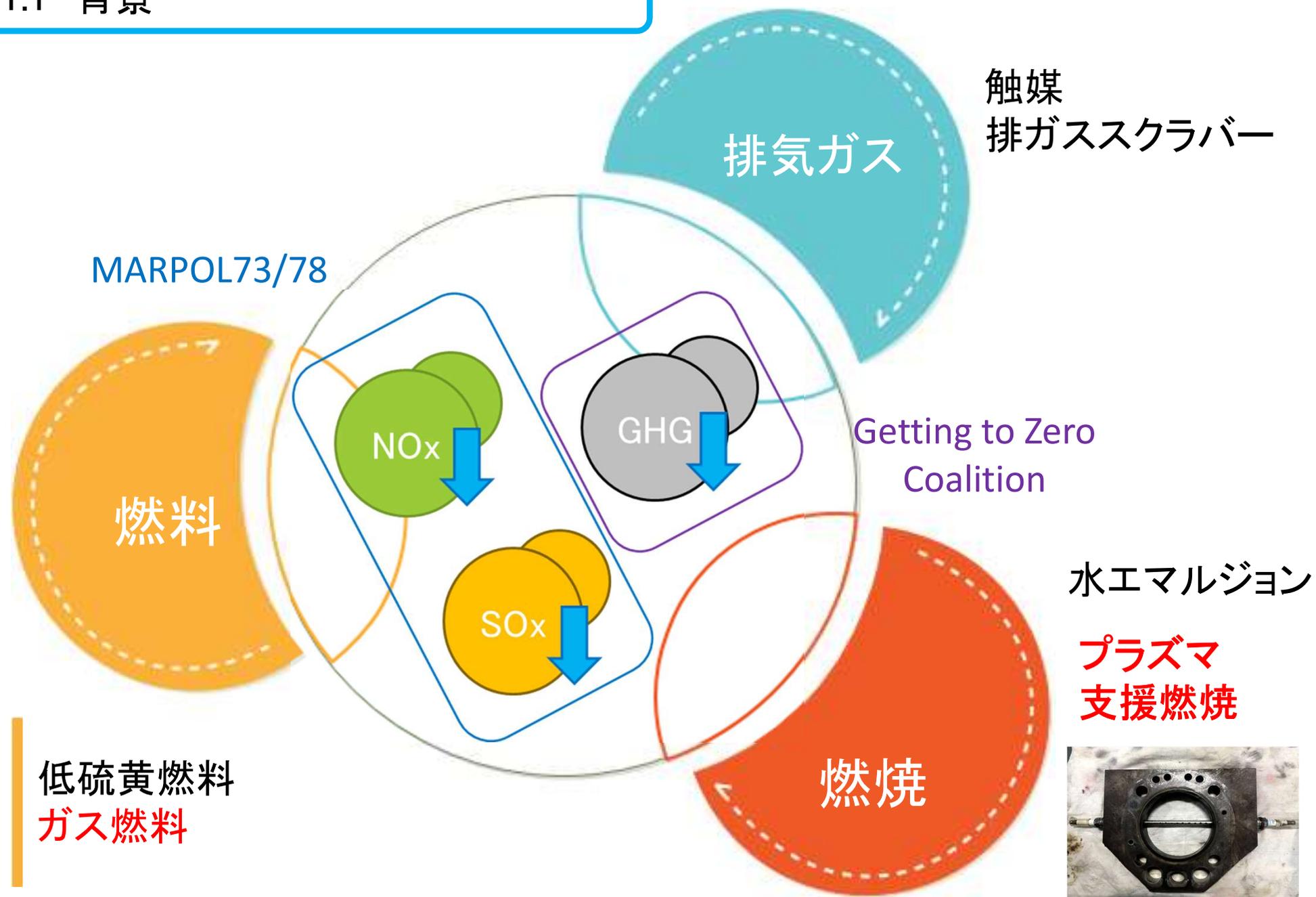
- 4.1 大気圧流れ放電実験結果
- 4.2 DFエンジン内の放電実験結果

05

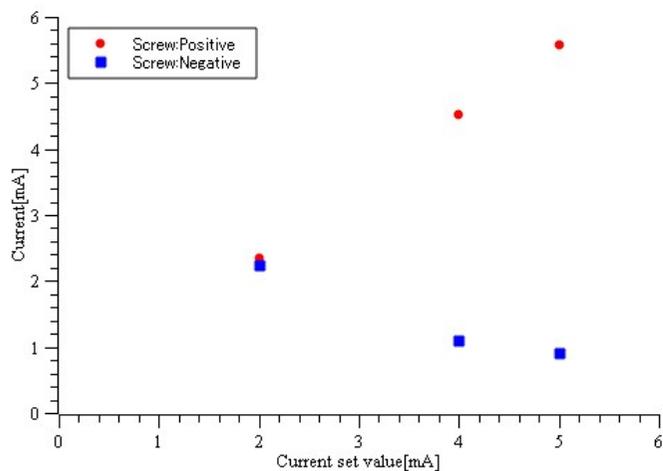
Conclusion

- 5.1 大気圧流れ放電実験まとめ
- 5.2 DFエンジン内の放電実験まとめ
- 5.3 今後の方針

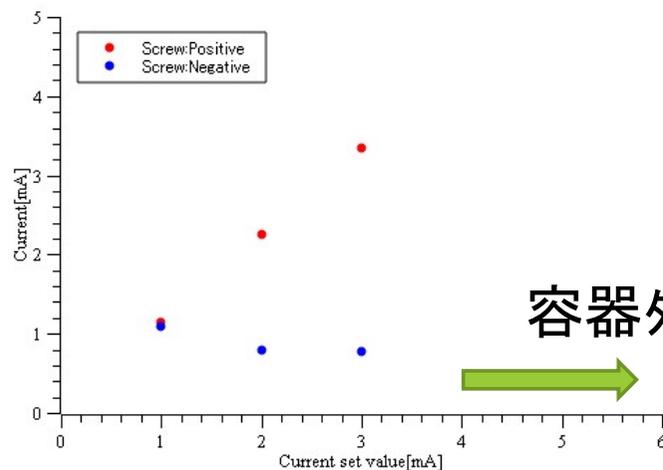
1.1 背景



1.2 当研究室での先行研究

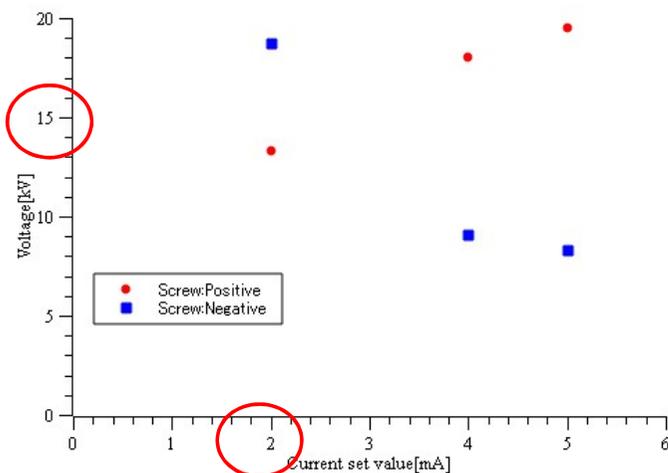


(a) Current



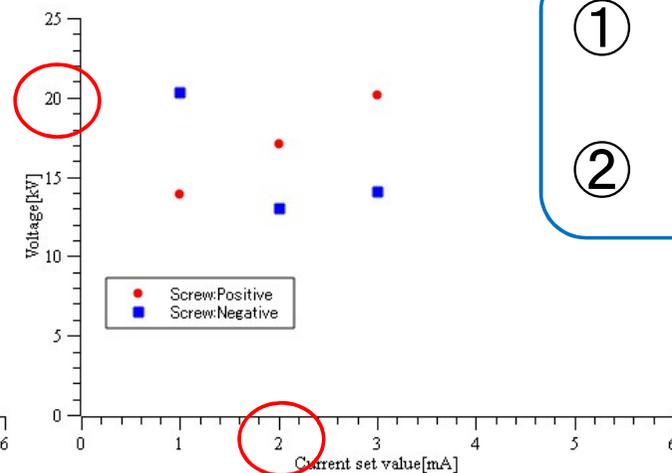
容器外で放電

(a) Current



(b) Voltage

1 [MPa]



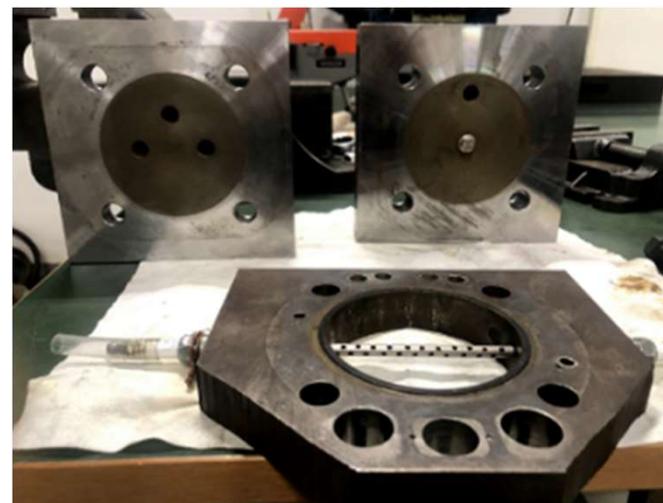
(b) Voltage

2 [MPa]

- ① 電流増加 → 電圧増加
- ② 圧力増加 → 放電不安定

1.2 当研究室での先行研究

天然ガスに10秒間の放電をした後...



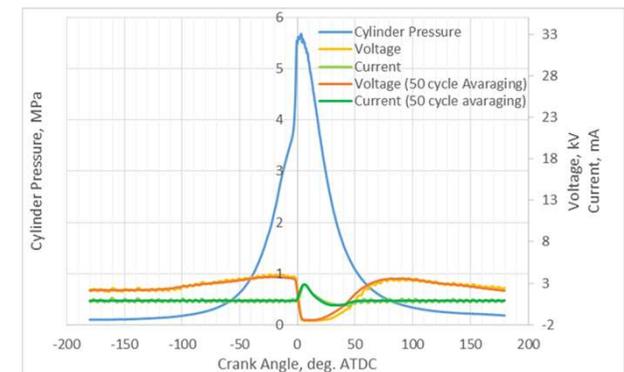
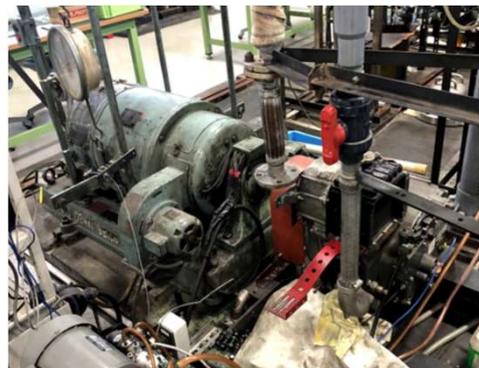
天然ガスに放電すると
水素: **不検出** 一酸化炭素: **検出**
⇒ **放電により、何らかの反応あり**

1.3 実験目的

本実験の目的

プラズマ支援燃焼をDFエンジンに適用した場合

⇒ 流速下での放電現象？
プラズマ支援燃焼の効果？



- (1) 一定流速下での放電特性の変化(電流・電圧)
エンジンに取り付け...
- (2) 放電の有無による筒内圧の変化
- (3) 放電の有無による排ガス特性の変化

Table of contents

01

Introduction

- 1.1 背景
- 1.2 当研究室での先行研究
- 1.3 実験目的

02

Plasma assisted
combustion?

- 2.1 プラズマ支援燃焼の概念
- 2.2 放電電流と電圧の関係
- 2.3 プラズマ支援燃焼内での反応

03

Experimental
procedure

- 3.1 大気圧流れ放電実験
- 3.2 DFエンジン内の放電実験

04

Results
& discussion

- 4.1 大気圧流れ放電実験結果
- 4.2 DFエンジン内の放電実験結果

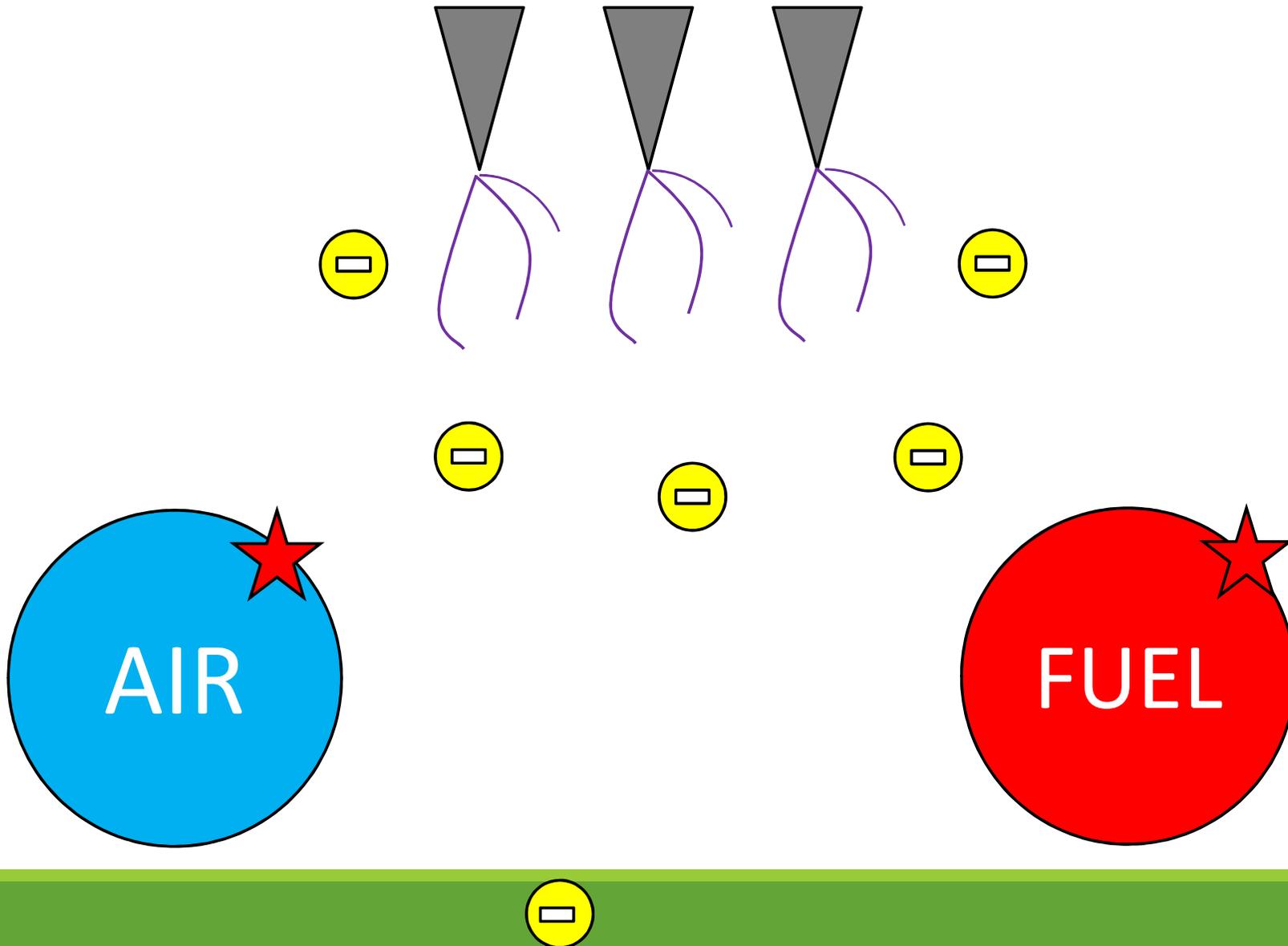
05

Conclusion

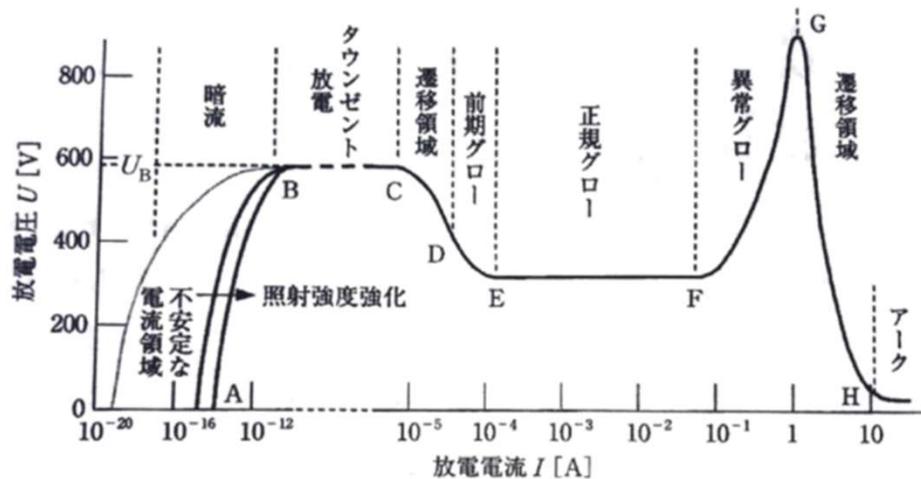
- 5.1 大気圧流れ放電実験まとめ
- 5.2 DFエンジン内の放電実験まとめ
- 5.3 今後の方針

2.1 プラズマ支援燃焼の概念

- … 放電から生成した電子による電離作用
→ 燃焼性を向上



2.2 放電電流と電圧の関係



Source:

高木浩一・金沢誠司編著 猪原哲・上野高寿・川崎敏之・高橋克幸共著、高電圧パルスパワー工学、初版、東京、理工図書、2018(実践的技術者のための電気電子系教科書シリーズ)

放電前 : 電圧が上昇



放電開始 : 電圧が下がり、不安定化(遷移状態)



グロー放電 : 電流に関わらず、電圧はほぼ一定

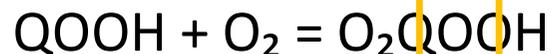
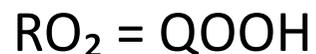
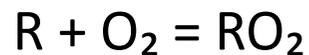
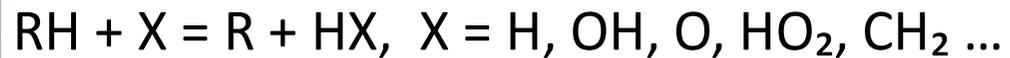


放電状態の遷移 : 電圧が上がり、不安定



アーク放電 : 電圧が極端に下がる

2.3 プラズマ支援燃焼内での反応



... 連鎖初期反応(反応速度が遅い)
→ 燃焼反応を制限

連鎖反応内でイオン・ラジカル増加

副生成物として
 H_2 と O_3 生成



連鎖初期反応を加速
→ 全体の反応を加速

Table of contents

01

Introduction

- 1.1 背景
- 1.2 当研究室での先行研究
- 1.3 実験目的

02

Plasma assisted
combustion?

- 2.1 プラズマ支援燃焼の概念
- 2.2 放電電流と電圧の関係
- 2.3 プラズマ支援燃焼内での反応

03

Experimental
procedure

- 3.1 大気圧流れ放電実験
- 3.2 DFエンジン内の放電実験

04

Results
& discussion

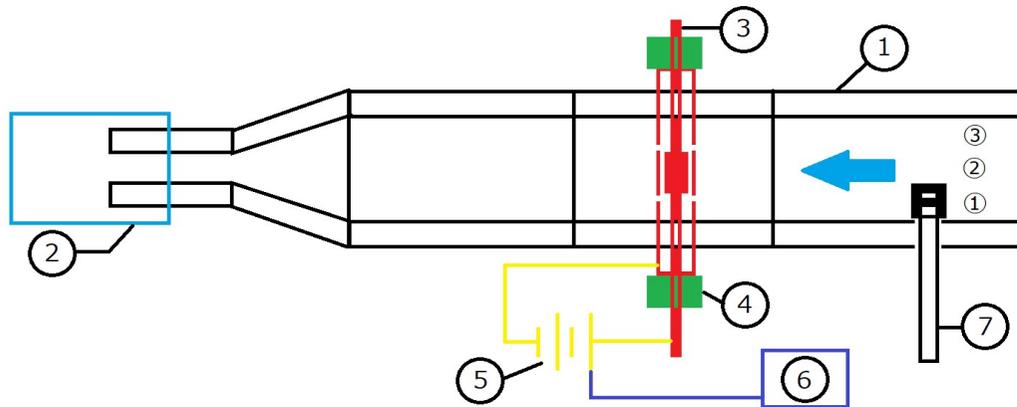
- 4.1 大気圧流れ放電実験結果
- 4.2 DFエンジン内の放電実験結果

05

Conclusion

- 5.1 大気圧流れ放電実験まとめ
- 5.2 DFエンジン内の放電実験まとめ
- 5.3 今後の方針

3.1 大気圧流れ放電実験



1. PVC Pipe (TS Joint 65A)
2. Suction Machine
3. Electrode Set
4. Insulation Parts
5. DC Power Supply
(Voltage:0~30[kV] Current:0~10[mA])
6. Data Logger
7. Hot Wire Anemometer

・実験方法

- ① 吸引機に加わる電圧を制御し、風速を変化させる
- ② 風速を測定 (半径方向3カ所・5秒間の測定値の平均)
→ 2.75(最低風速), 3, 5, 7.5[m/s]
- ② 電圧を大きく設定 → 電圧が自由に変動できる
- ③ 電流設定 (2、4、…、10[mA]まで)
- ④ 放電させ、1ms間隔で合計1秒間測定 → 3回

3.1 大気圧流れ放電実験

使用した電極

- ・M3 + エンザート
- ・インコネルチューブ (外径10[mm] × 内径8[mm])

陽極



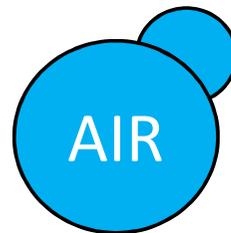
陰極



・実験条件

大気

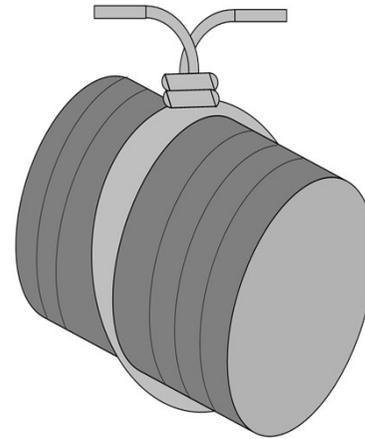
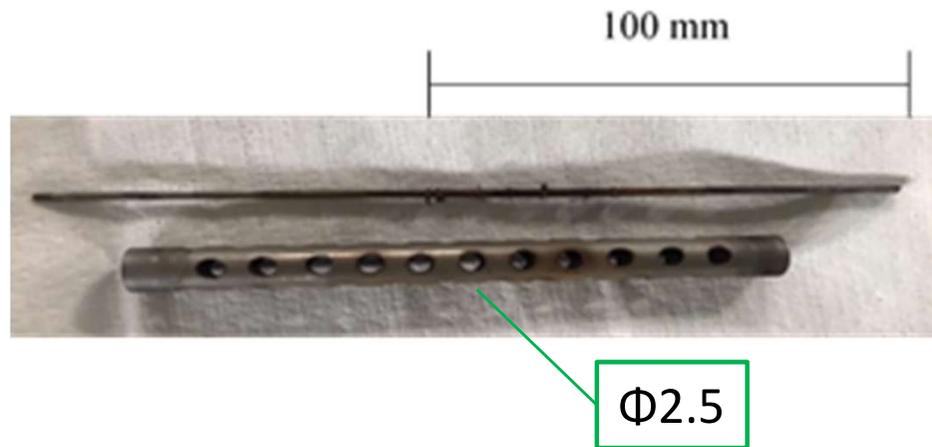
(18.4[°C] 湿度58[%] 1020[hPa])



3.1 大気圧流れ放電実験

使用した電極

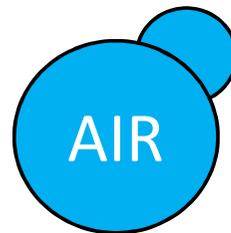
- ・M2 x 0.4 + 少量の針金を巻いたもの
- ・インコネルチューブ (外径10[mm] × 内径8[mm])



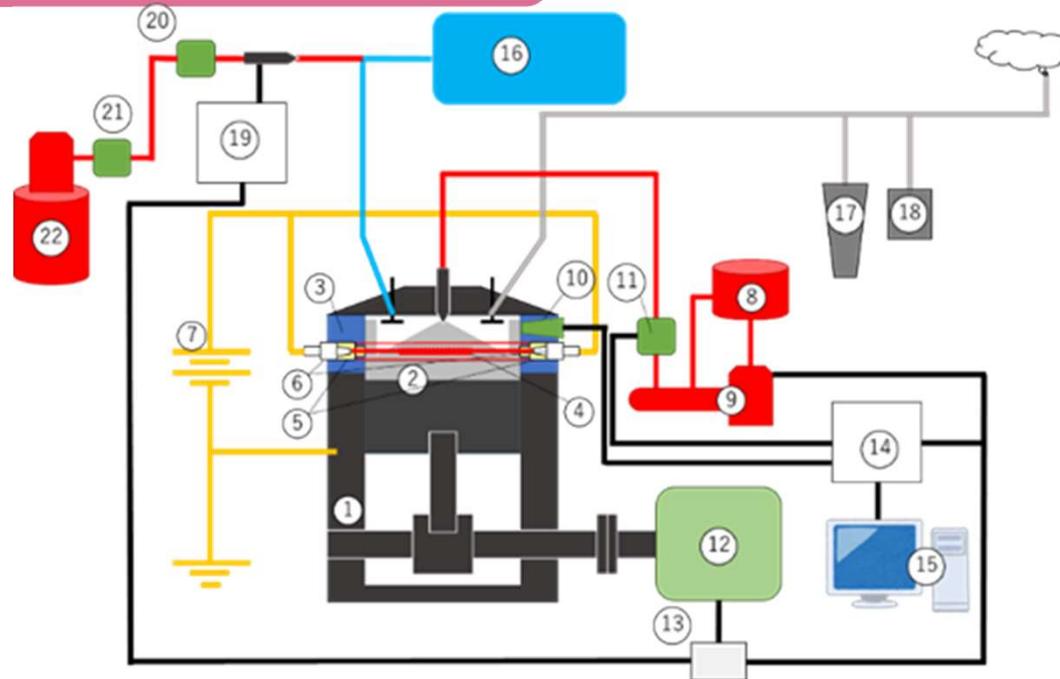
・実験条件

大気

(26.8[°C] 湿度82[%] 1013[hPa])

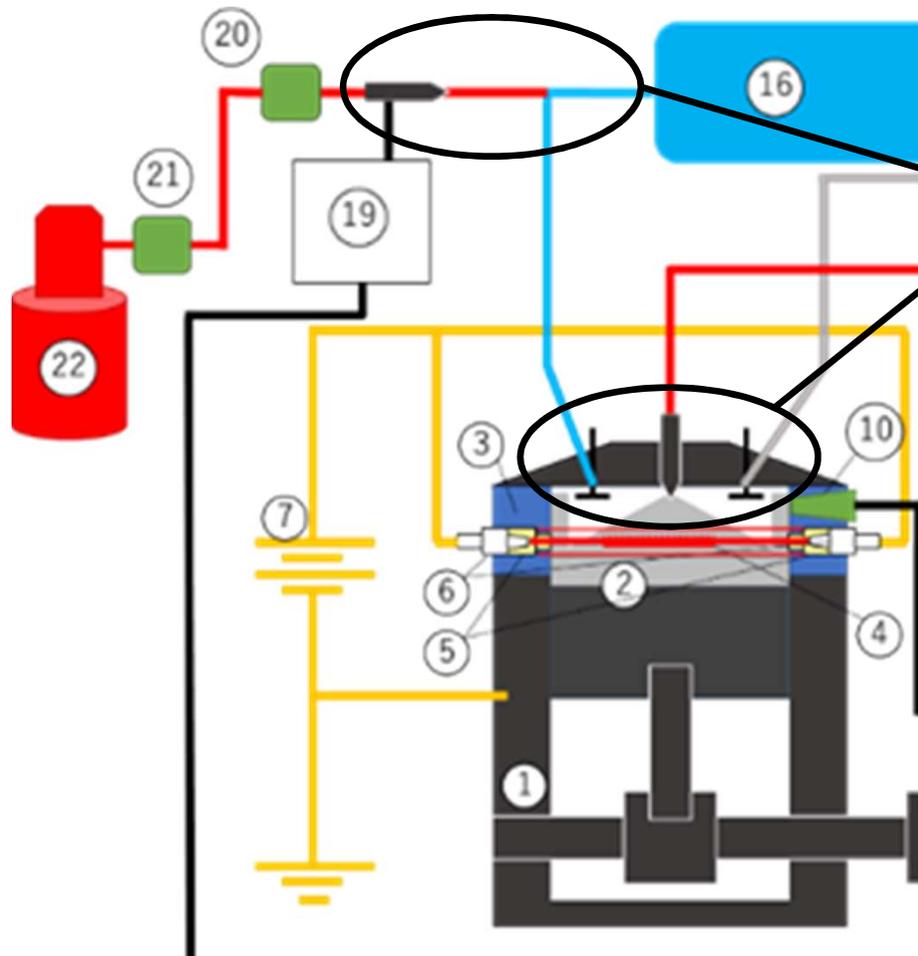


3.2 DFエンジン内の放電実験



- (1) Engine (2) Piston crown for electrode insertion
- (3) Cylinder block for the electrodes' insertion
- (4) Electrodes (5) Insulation sleeve (6) High voltage introduction plug
- (7) High Voltage Power Supply (8) Fuel tank (9) Common rail fuel injection system
- (10) In-cylinder pressure sensor (11) Fuel injection pressure sensor
- (12) Electrical power meter (13) Rotary encoder (14) Data Logger (15) PC
- (16) Intake air surge tank (17) Portable exhaust gas analyzer
- (18) Automotive exhaust gas analyzers (19) Injector driver and Arduino
- (20) Gas flowmeter (21) Pressure regulator (22) Natural gas cylinder

3.2 DFエンジン内の放電実験



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)

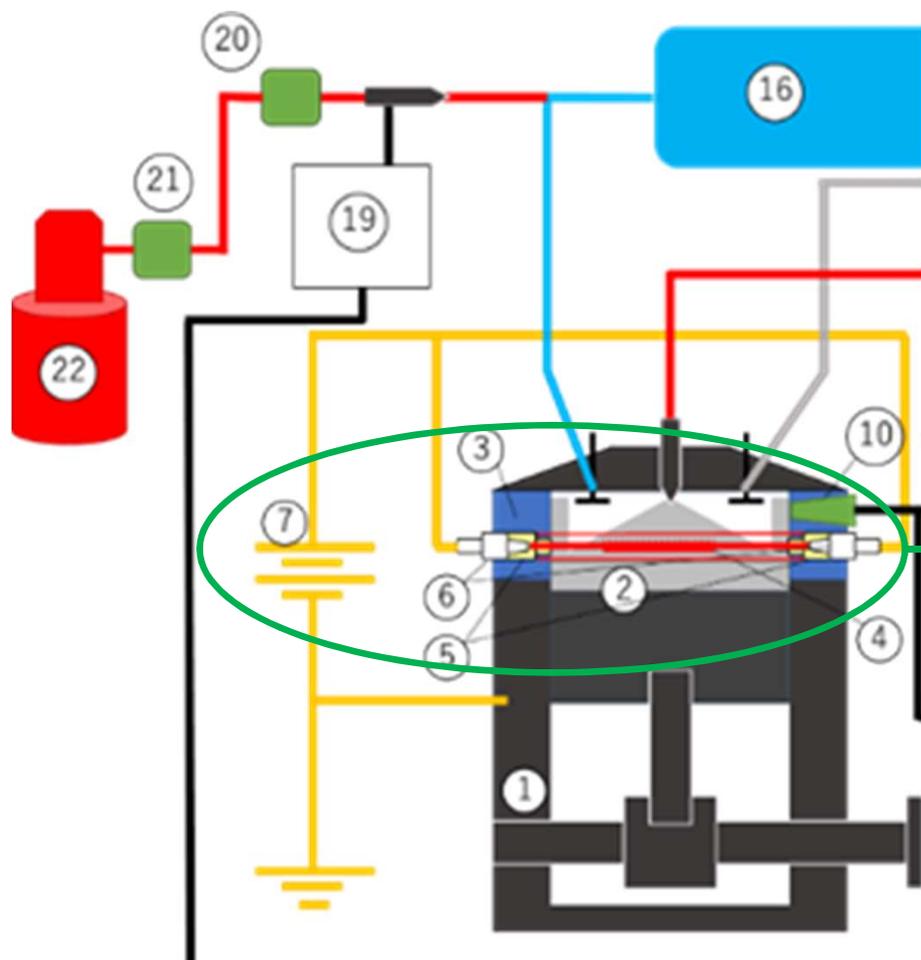
噴射ポンプ: コモンレール方式

噴射ノズル: 4孔式

開弁圧: 16.7MPa

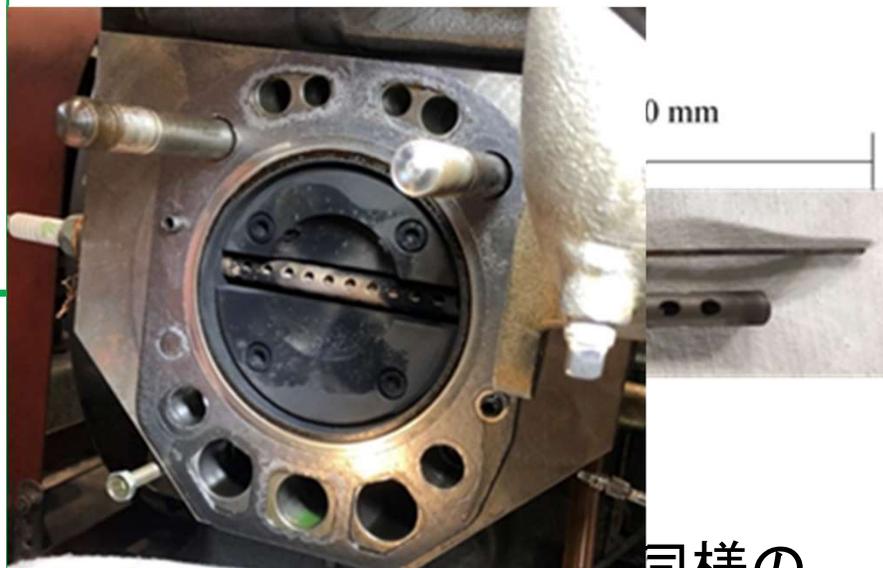
閉弁圧: 13.36MPa (開弁圧の80%)

3.2 DFエンジン内の放電実験



使用した電極

・M2 x 0.4 + 少量の針金を巻いたもの



高電圧直流電源と同様の
高電圧直流電源

3.2 DFエンジン内の放電実験

Table 3.1: Operational conditions on engine experiment

Operation conditions		1	2	3	4	5	6
Number of rotations	rpm	2000					
Load	kW	1.5					
Diesel oil injection	-	BTDC13° ,0.90ms			BTDC13° ,0.86ms		
Natural gas injection	-	ATDC38.5° ,2ms			ATDC38.5° ,3ms		
Curent set value	mA	-	0.5	4.0	-	0.5	4.0

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]

放電: 電流[mA]、電圧[kV]

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]、NOx[ppm]、O₂[%]

任意のクランク角度における熱発生率

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

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]

3.2 DFエンジン内の放電実験(式の補足)

熱力学第一法則から

$$dQ = dU + pdV \cdots \cdots (3.4)$$

ボイル-シャルルの法則から

$$PV = GRT \cdots \cdots (3.5)$$

式(3.5)を微分して

$$\begin{aligned} PdV + VdP &= GRdT \\ \Leftrightarrow PdV + VdP &= G(c_p - c_v)dT \cdots \cdots (3.6) \end{aligned}$$

また、定積比熱の式から

$$dU = c_v GdT \cdots \cdots (3.7)$$

そして、式(3.4)に上記の(3.5)から(3.7)を代入すると、熱量 dQ が以下のように求まる。

$$dQ = \frac{1}{\kappa - 1} (kPdV + VdP) \cdots \cdots (3.8)$$

上記より微小な、つまり任意のクランク角度 $d\theta$ における熱発生率 $dQ/d\theta$ は、式(3.9)で表される。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(kP \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) \cdots \cdots (3.9)$$

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 [m^3]

Table of contents

01

Introduction

- 1.1 背景
- 1.2 当研究室での先行研究
- 1.3 実験目的

02

Plasma assisted
combustion?

- 2.1 プラズマ支援燃焼の概念
- 2.2 放電電流と電圧の関係
- 2.3 プラズマ支援燃焼内での反応

03

Experimental
procedure

- 3.1 大気圧流れ放電実験
- 3.2 DFエンジン内の放電実験

04

Results
& discussion

- 4.1 大気圧流れ放電実験結果
- 4.2 DFエンジン内の放電実験結果

05

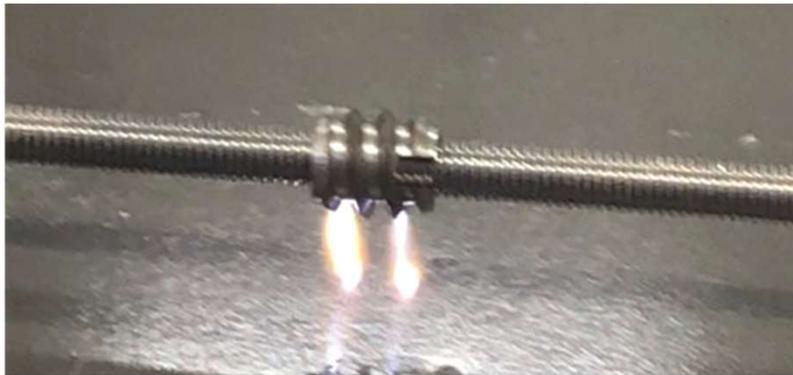
Conclusion

- 5.1 大気圧流れ放電実験まとめ
- 5.2 DFエンジン内の放電実験まとめ
- 5.3 今後の方針

4.1 大気圧流れ放電実験結果(1つ目の電極)

使用した電極

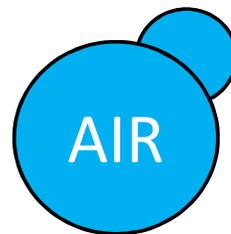
- ・M3 + エンザート
- ・インコネルチューブ (外径10mm × 内径8mm)



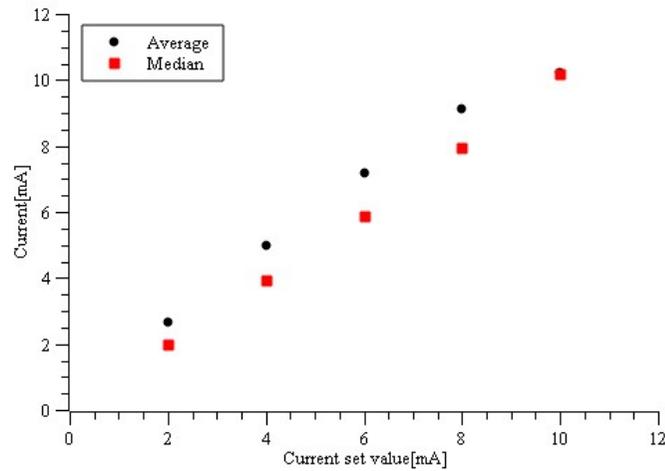
・実験条件

大気

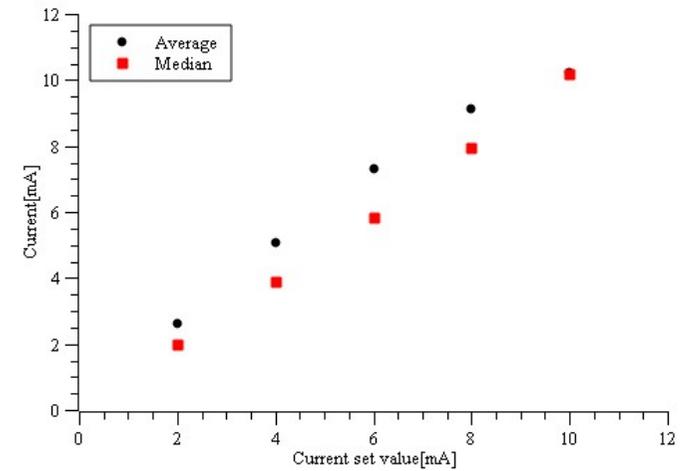
(18.4°C 湿度58% 1020hPa)



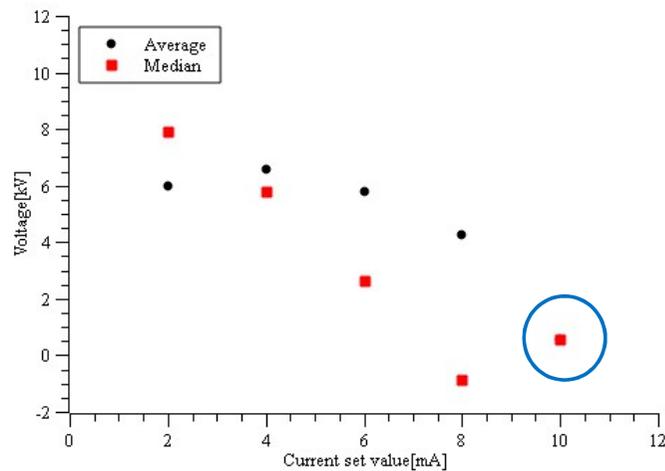
4.1 大気圧流れ放電実験結果(1つ目の電極)



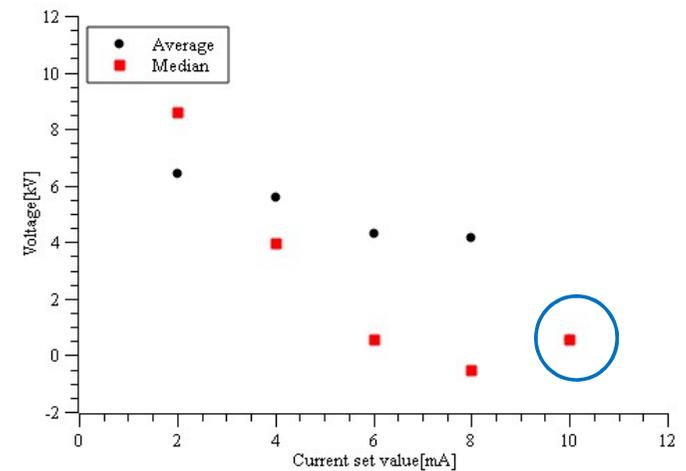
(a) Current



(a) Current

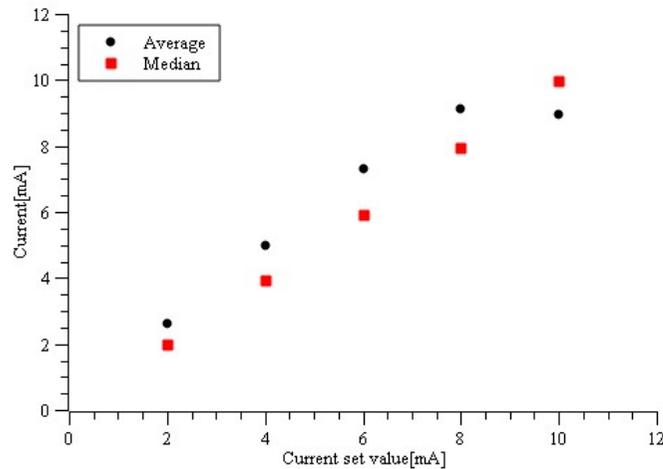


(b) Voltage
0[m/s]

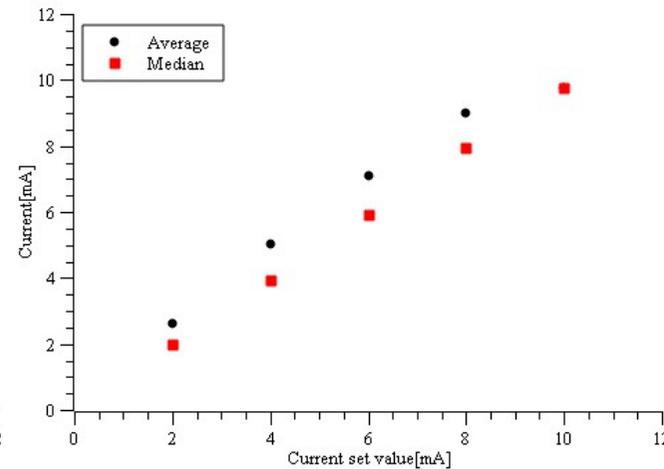


(b) Voltage
2.75[m/s]

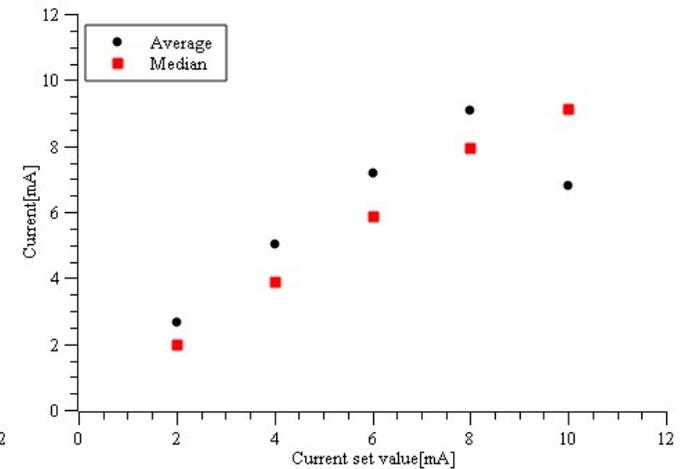
4.1 大気圧流れ放電実験結果(1つ目の電極)



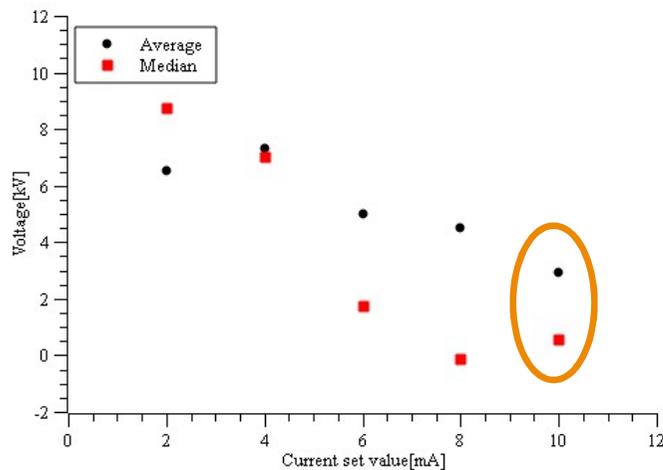
(a) Current



(a) Current

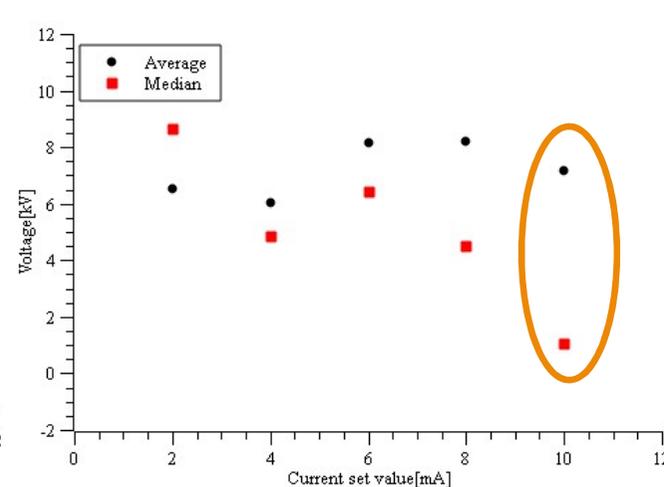


(a) Current



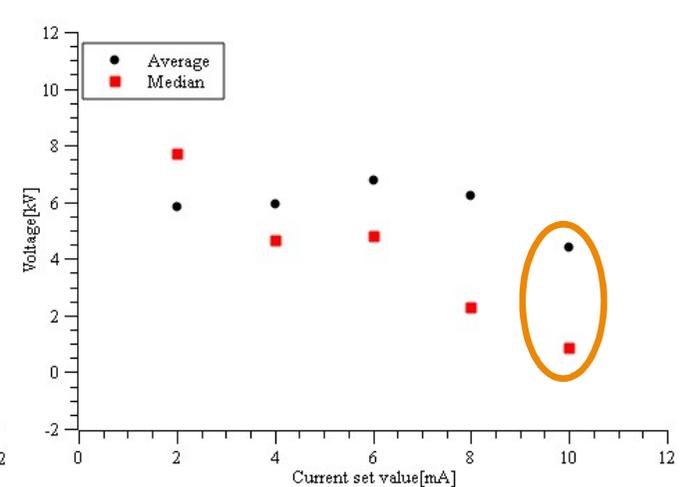
(b) Voltage

3[m/s]



(b) Voltage

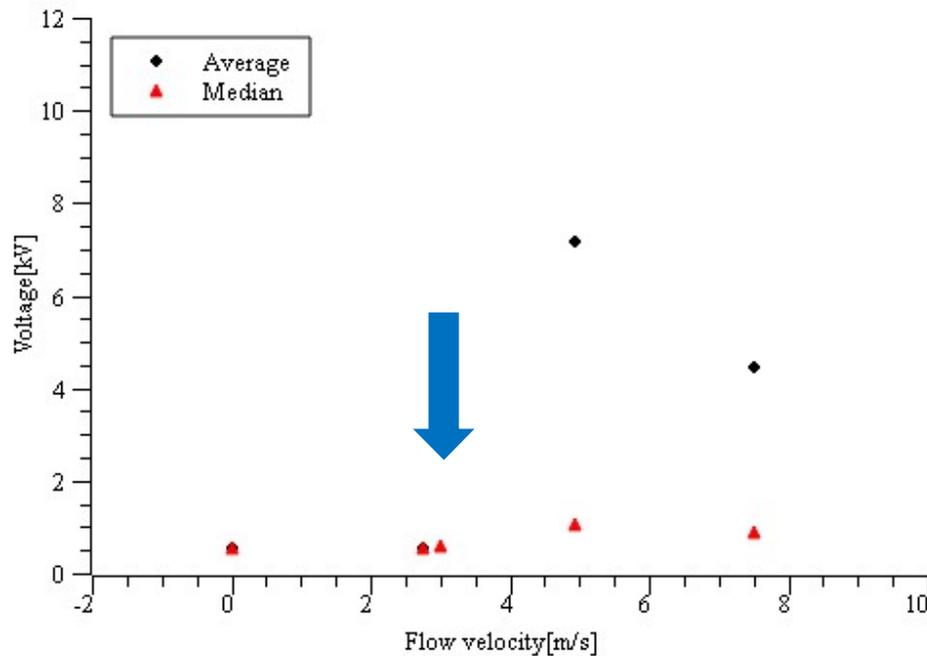
5[m/s]



(b) Voltage

7.5[m/s]

4.1 大気圧流れ放電実験結果(1つ目の電極)



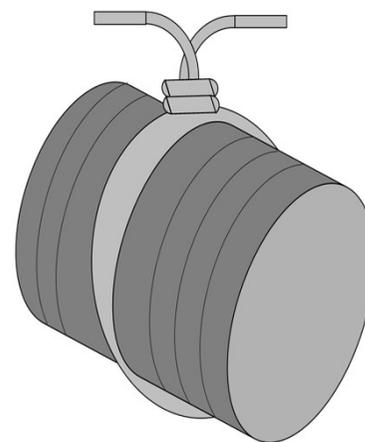
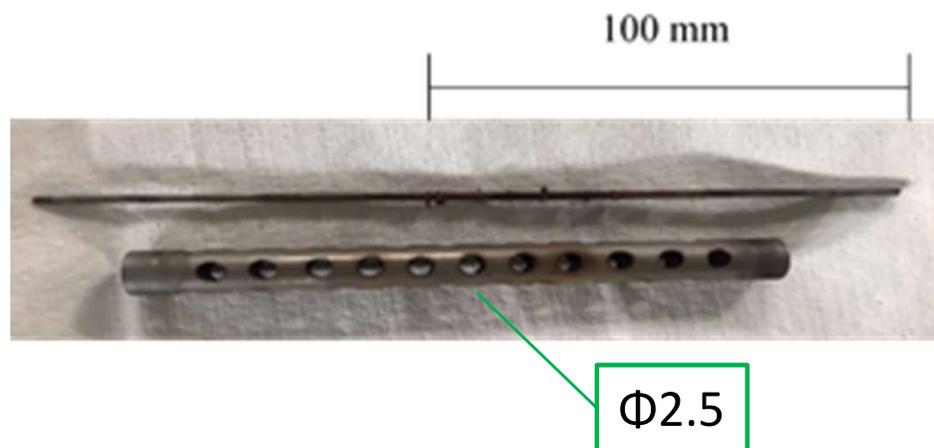
Flow velocity-Voltage
At 10[mA] (Current set value)

- ・流速による変化(10mA : アーク放電)
→ 3m/s以上では、中央値と平均値に差
→ **アーク放電が生じにくい**

4.1 大気圧流れ放電実験結果(2つ目の電極)

使用した電極

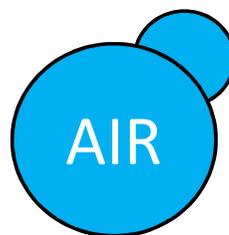
- ・M2 x 0.4 + 少量の針金を巻いたもの
- ・インコネルチューブ (外径10mm × 内径8mm)



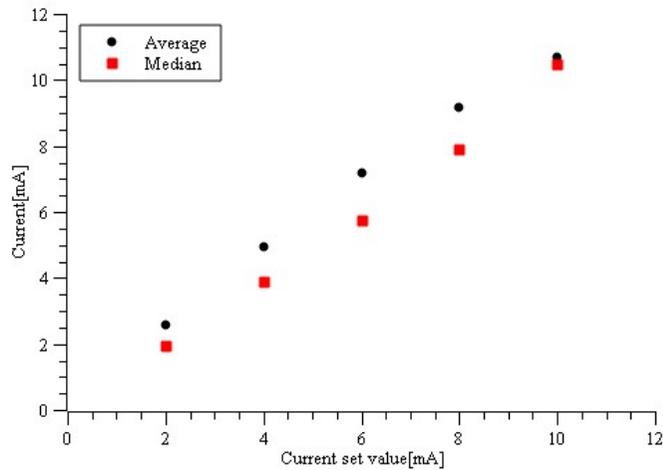
・実験条件

大気

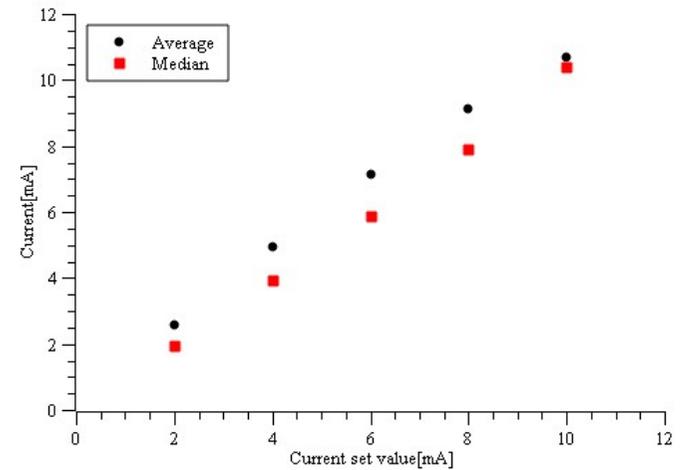
(26.8°C 湿度82% 1013hPa)



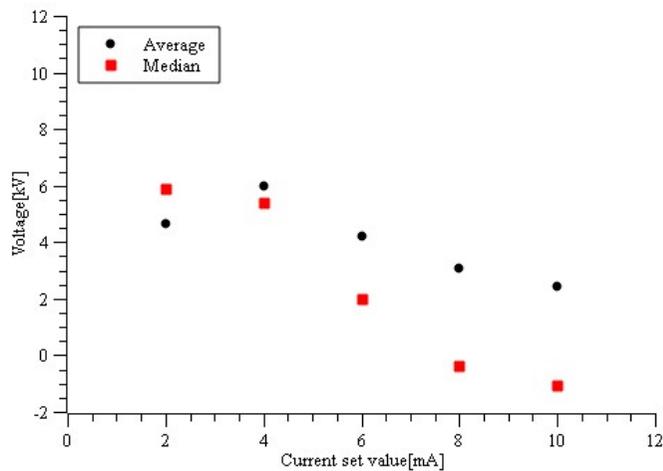
4.1 大気圧流れ放電実験結果(2つ目の電極)



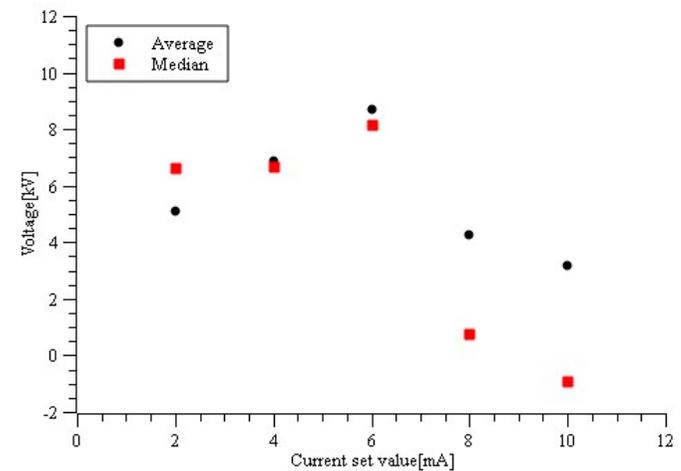
(a) Current



(a) Current

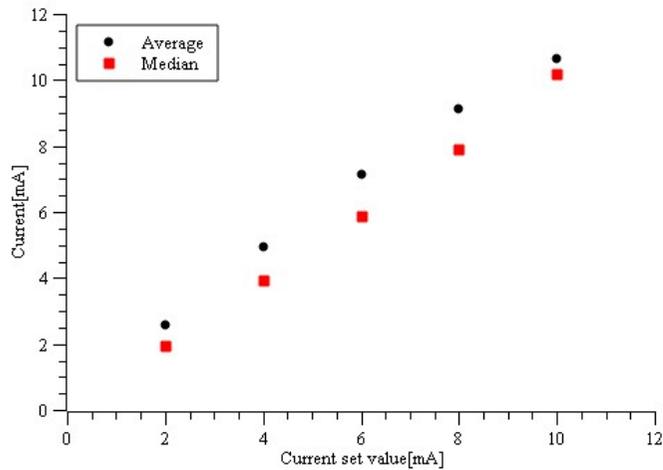


(b) Voltage
0[m/s]

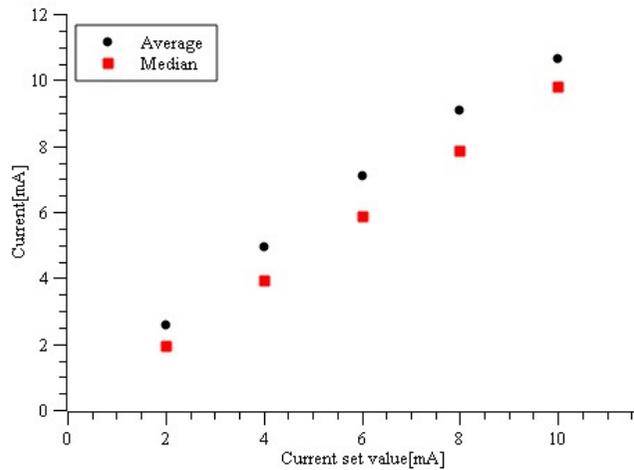


(b) Voltage
2.75[m/s]

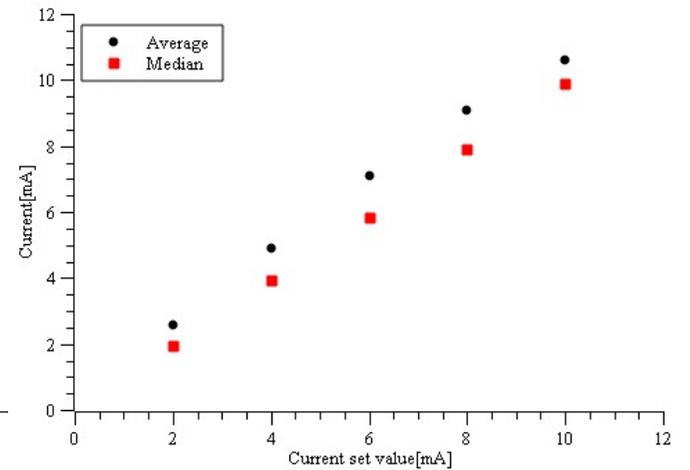
4.1 大気圧流れ放電実験結果(2つ目の電極)



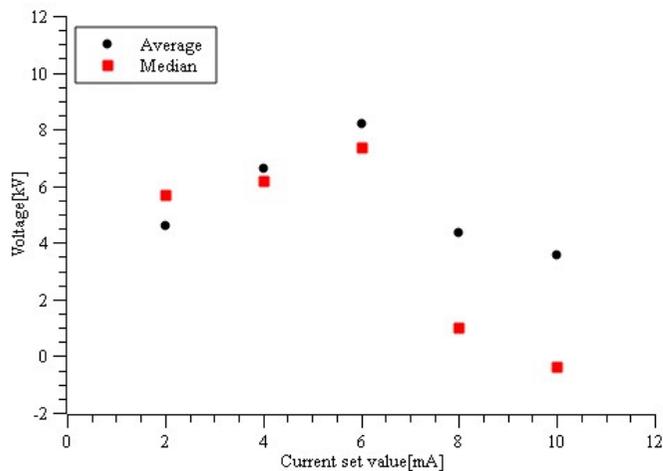
(a) Current



(a) Current

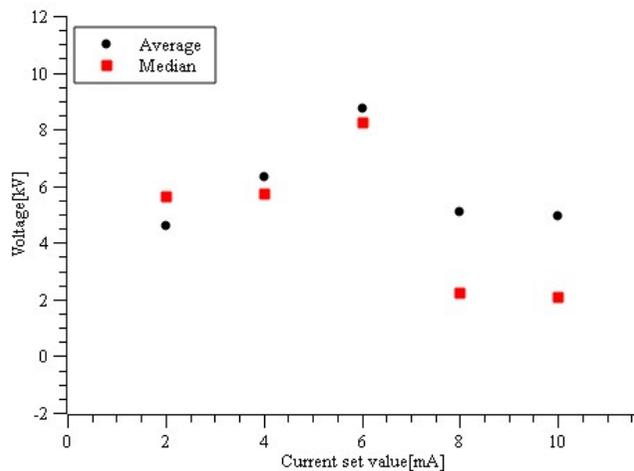


(a) Current



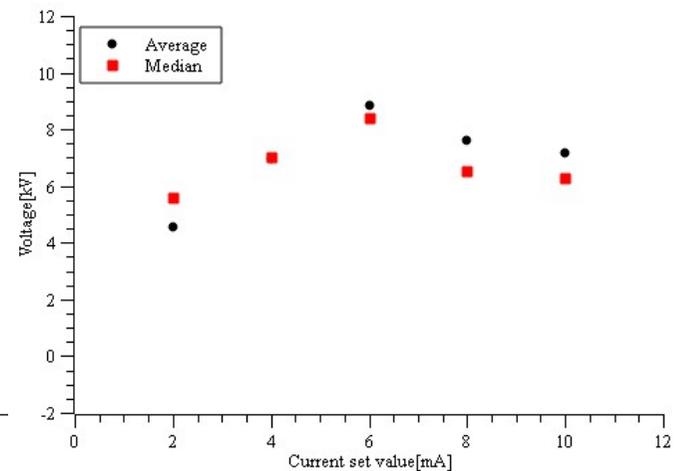
(b) Voltage

3[m/s]



(b) Voltage

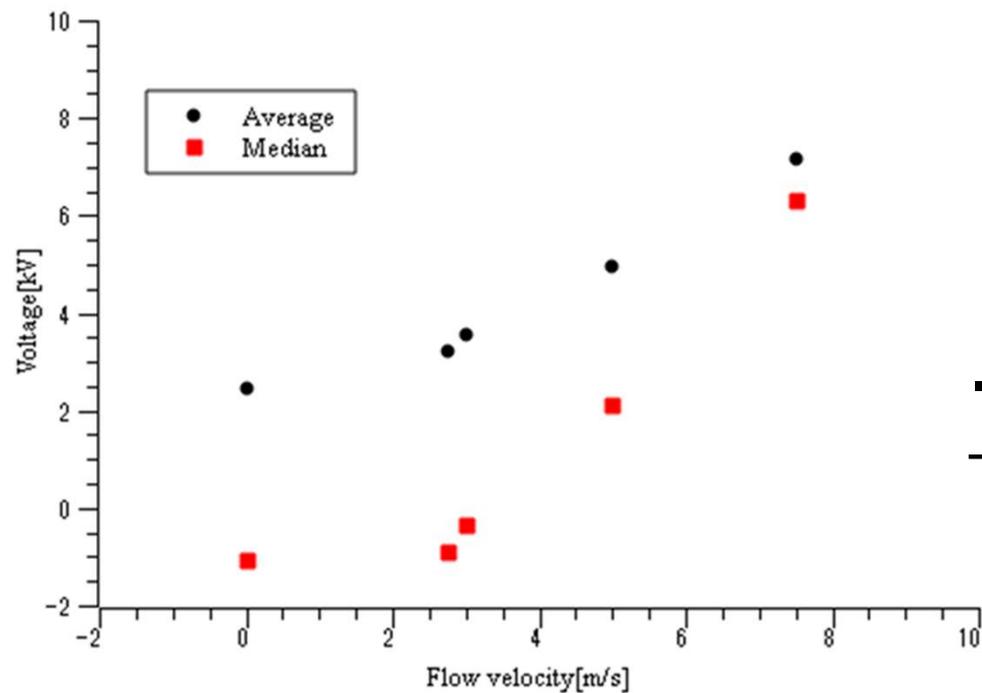
5[m/s]



(b) Voltage

7.5[m/s]

4.1 大気圧流れ放電実験結果(2つ目の電極)



・流速による変化(10mA : スパーク放電)
→3m/s以上では、差が減少

Flow velocity-Voltage
At 10[mA] (Current set value)

4.2 DFエンジン内の放電実験結果 (Natural gas: 0.1[MPa], 2[ms])

Table 3.1: Operational conditions on engine experiment

Operation conditions		1	2	3	4	5	6
Number of rotations	rpm	2000					
Load	kW	1.5					
Diesel oil injection	-	BTDC13° ,0.90ms			BTDC13° ,0.86ms		
Natural gas injection	-	ATDC38.5° ,2ms			ATDC38.5° ,3ms		
Curent set value	mA	-	0.5	4.0	-	0.5	4.0

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]

放電: 電流[mA]、電圧[kV]

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]、NOx[ppm]、O₂[%]

任意のクランク角度における熱発生率

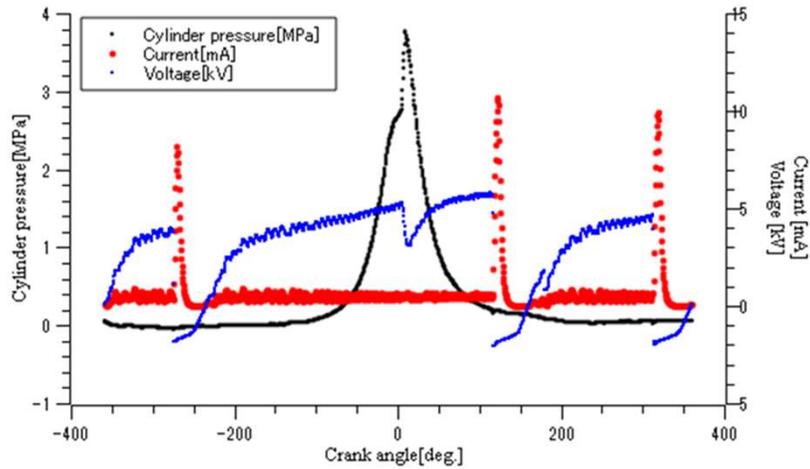
$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa-1} \left(kP \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) \cdot \cdot \cdot \cdot (3.1)$$

Q : 発生熱量 [J] θ : クランク角 [deg.]

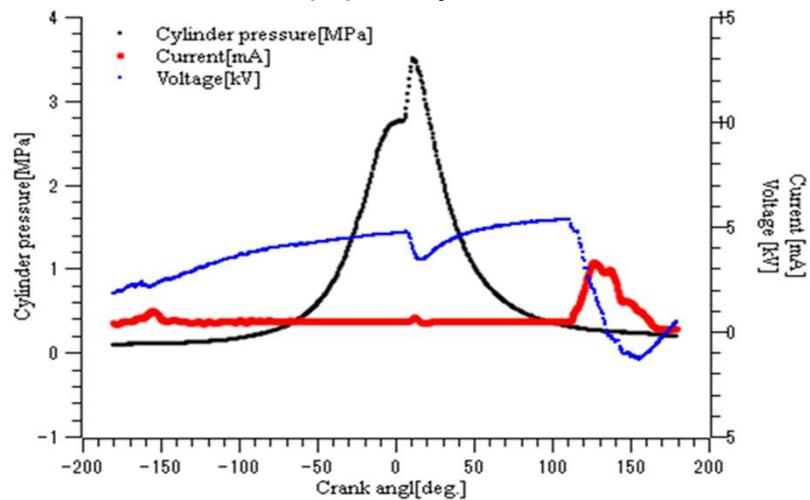
κ : 比熱比 1.4 [-] P : 筒内圧 [Pa]

V : シリンダー容積 [m³]

4.2.1 筒内圧と放電現象 (Natural gas: 0.1[MPa], 2[ms])

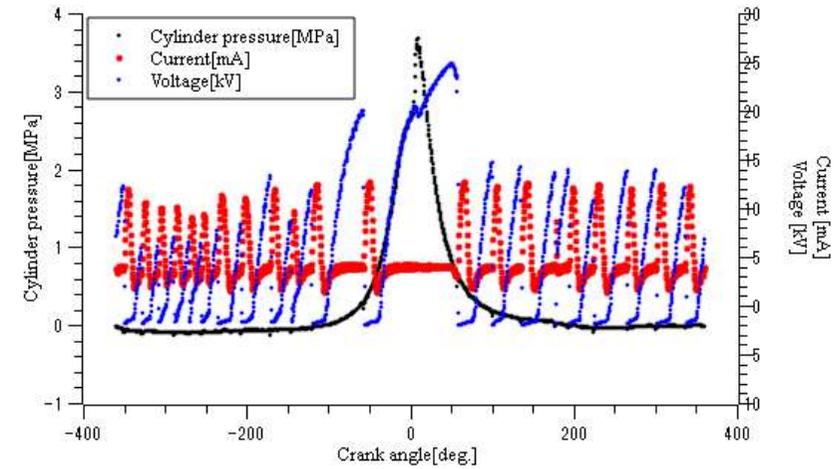


(a) 1 cycle

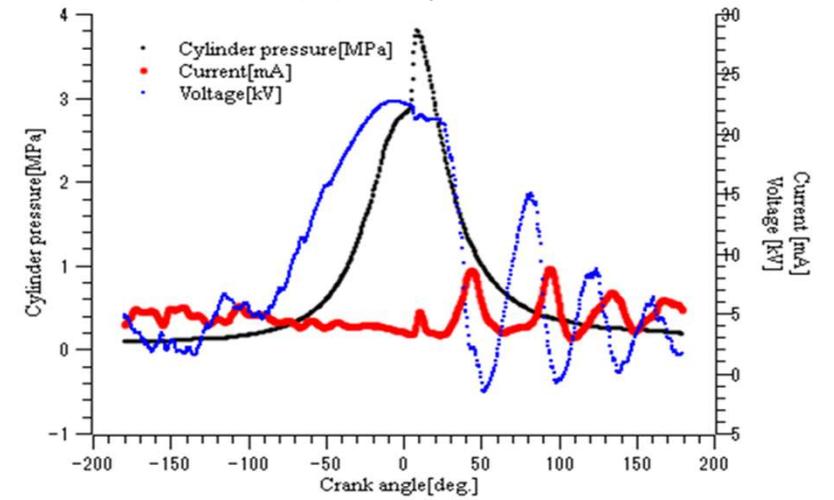


(b) Average of 50 cycles

Relation of cylinder pressure and discharge on 0.5[mA]



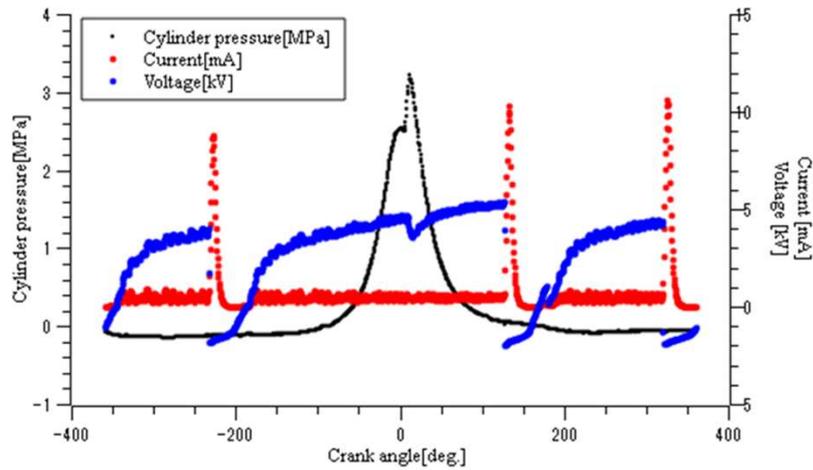
(a) 1 cycle



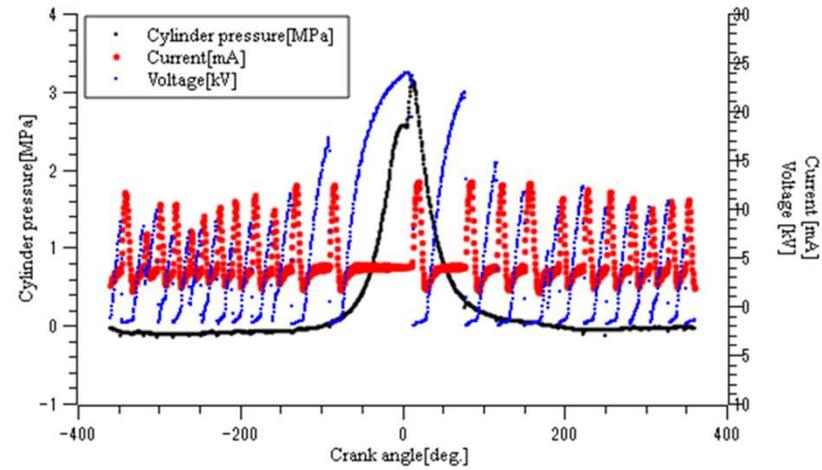
(b) Average of 50 cycles

Relation of cylinder pressure and discharge on 4[mA]

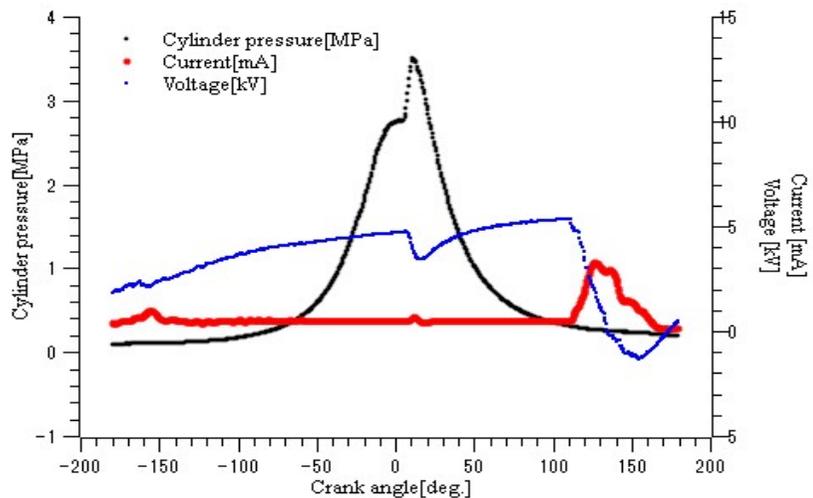
4.2.1 筒内圧と放電現象 (Natural gas: 0.1[MPa], 3[ms])



(a) 1 cycle

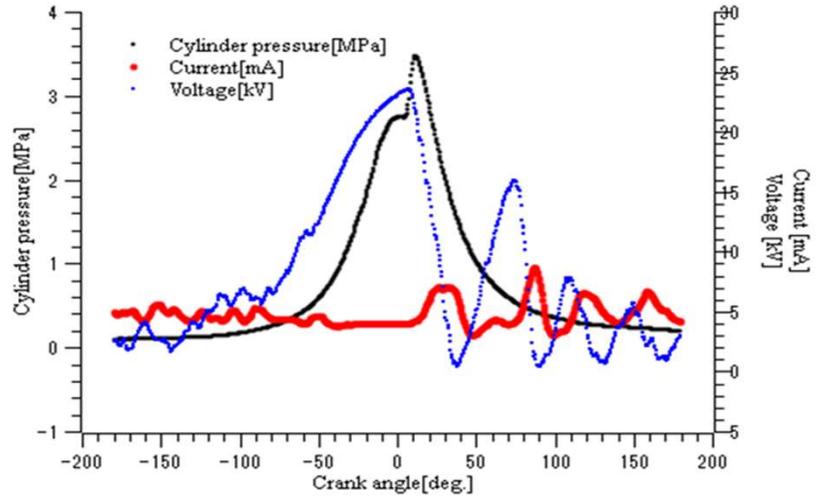


(a) 1 cycle



(b) Average of 50 cycles

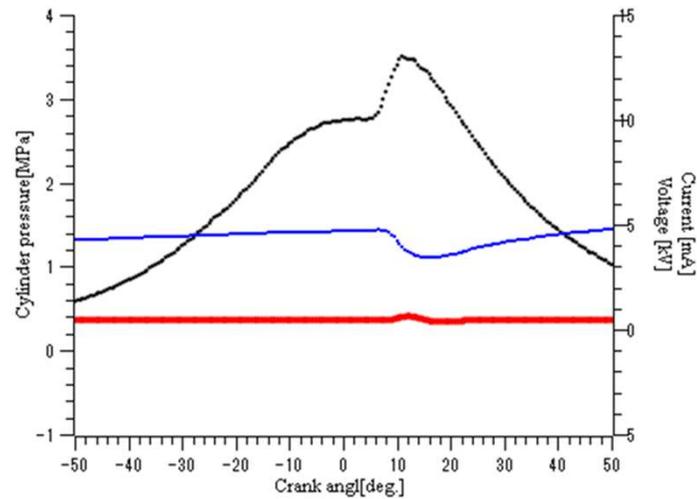
Relation of cylinder pressure and discharge on 0.5[mA]



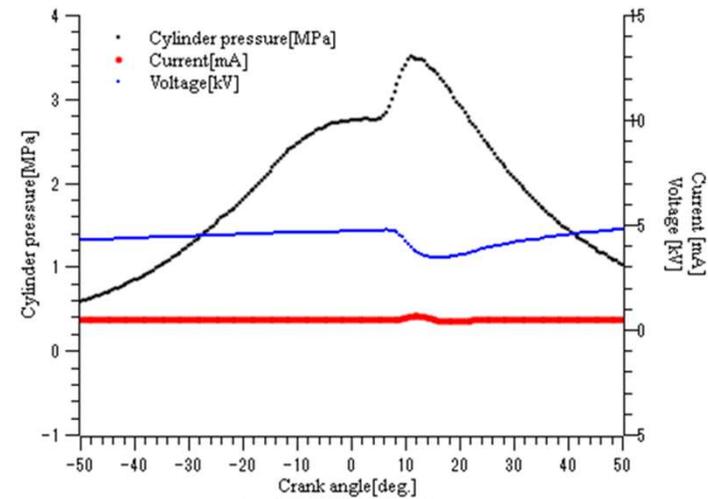
(b) Average of 50 cycles

Relation of cylinder pressure and discharge on 4[mA]

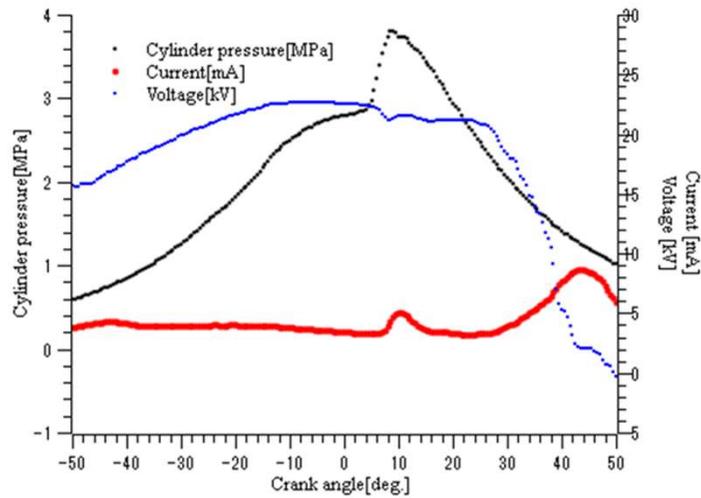
4.2.1 筒内圧と放電現象 (near TDC)



(a) 0.5mA

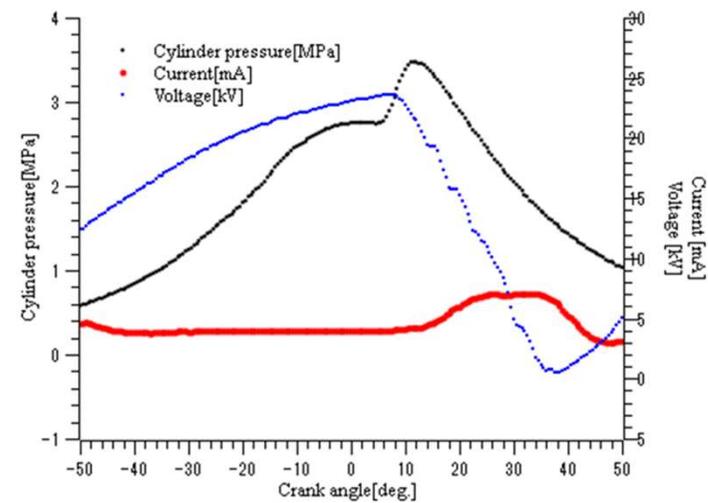


(a) 0.5mA



(b) 4mA

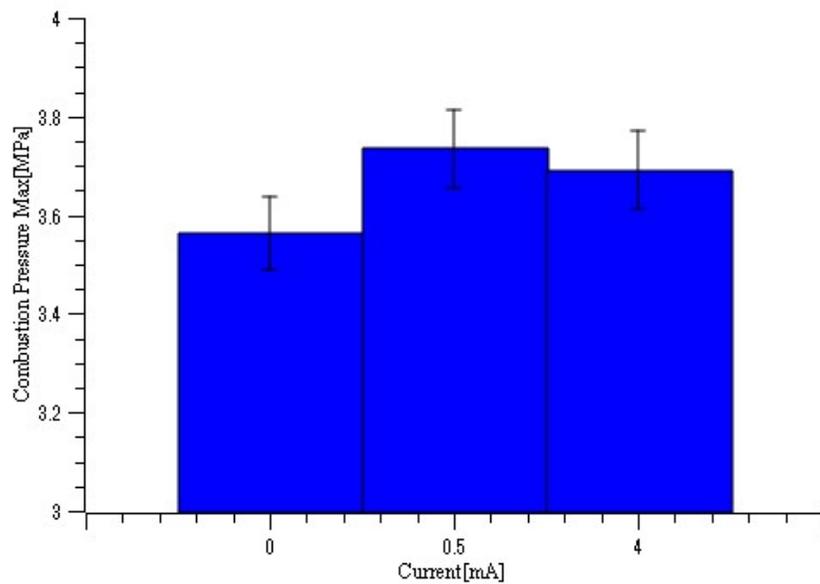
Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]



(b) 4mA

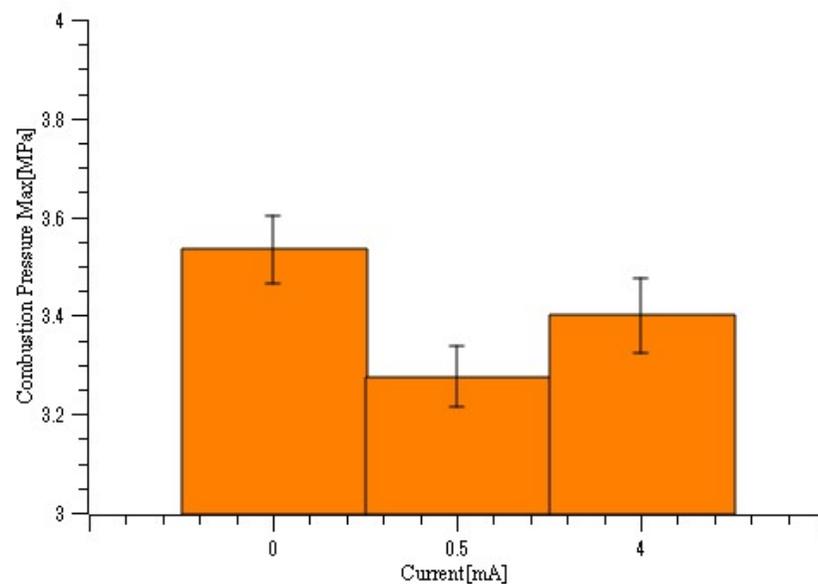
Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.2 最大筒内压



(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

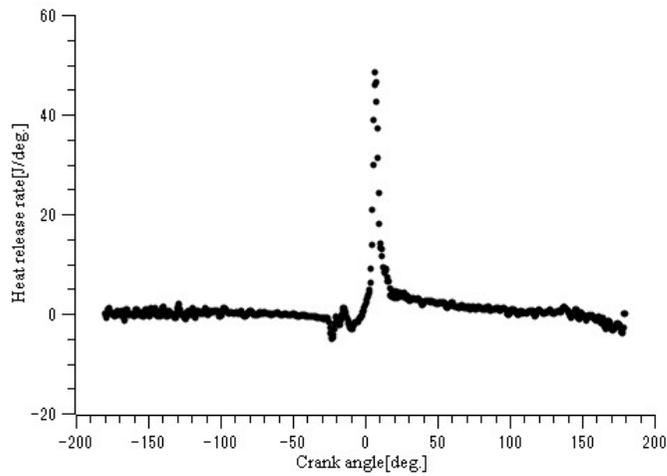
放電後 : 増加



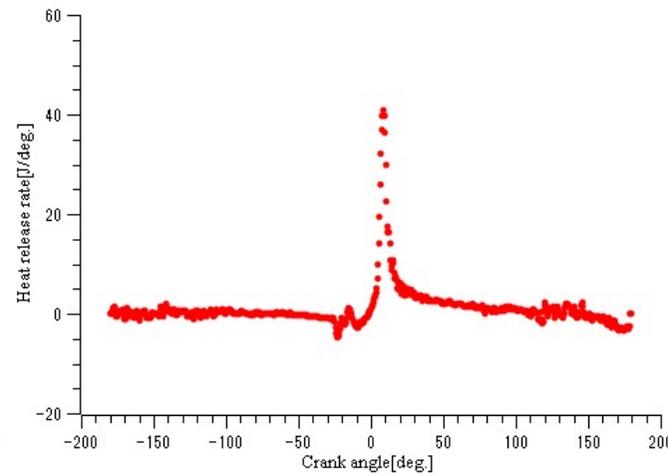
(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

放電後 : 減少

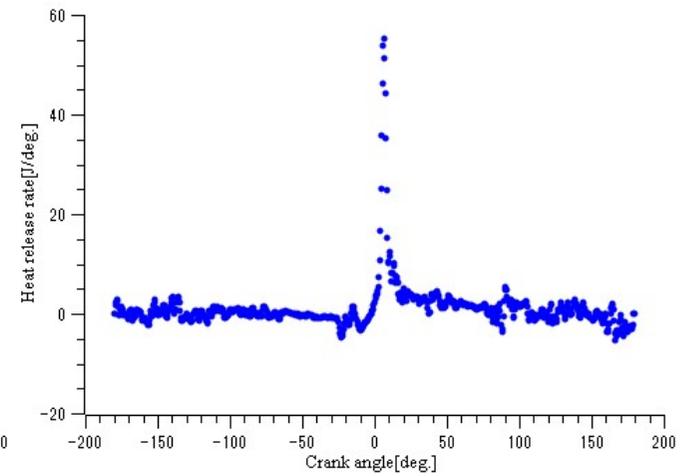
4.2.3 クランク角度－熱発生率 (Natural gas: 0.1[MPa], 2[ms])



(a) No discharge

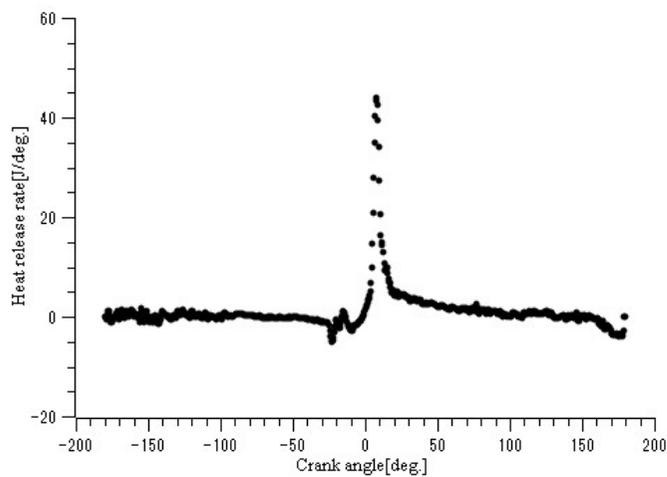


(b) 0.5mA

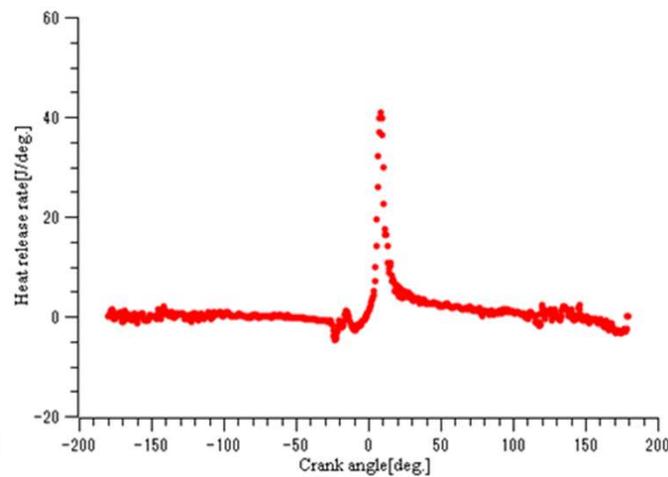


(c) 4mA

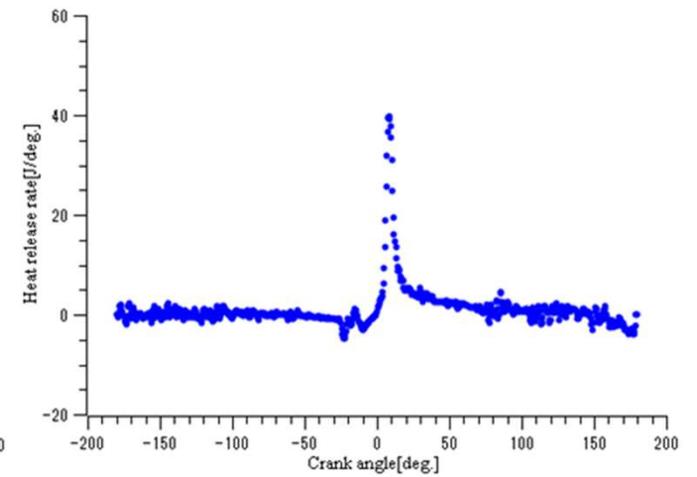
4.2.3 クランク角度－熱発生率 (Natural gas: 0.1[MPa], 3[ms])



(a) No discharge

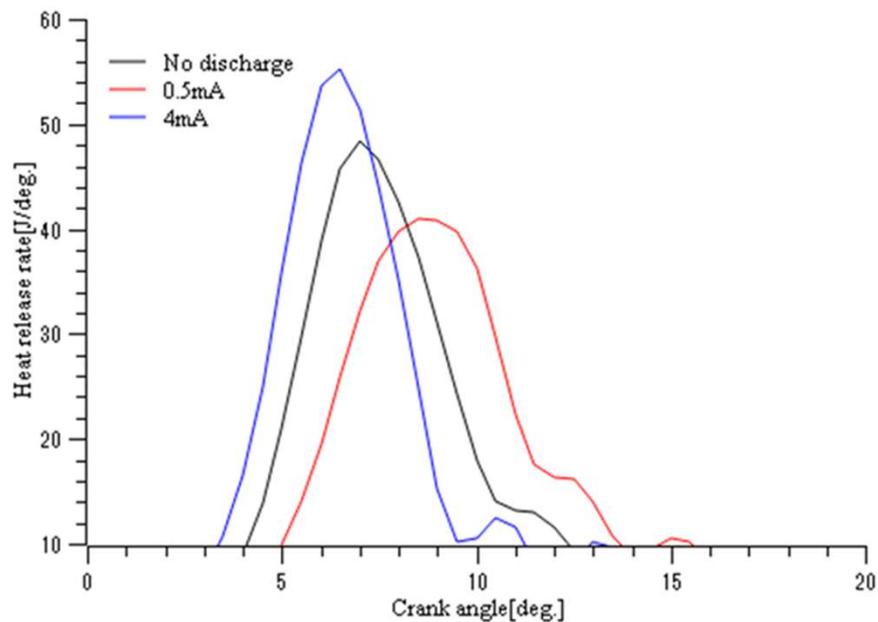


(b) 0.5mA



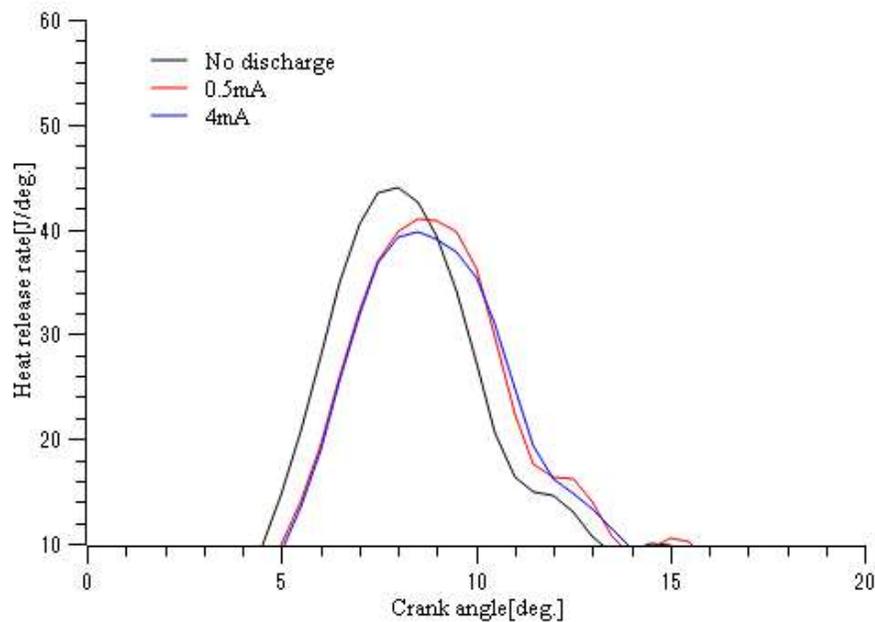
(c) 4mA

4.2.3 クランク角度－熱発生率 (near TDC)



(a) Natural gas: 0.1[MPa], 2[ms]

4mA : 上昇 + 進角



(b) Natural gas: 0.1[MPa], 3[ms]

減少 + 遅角

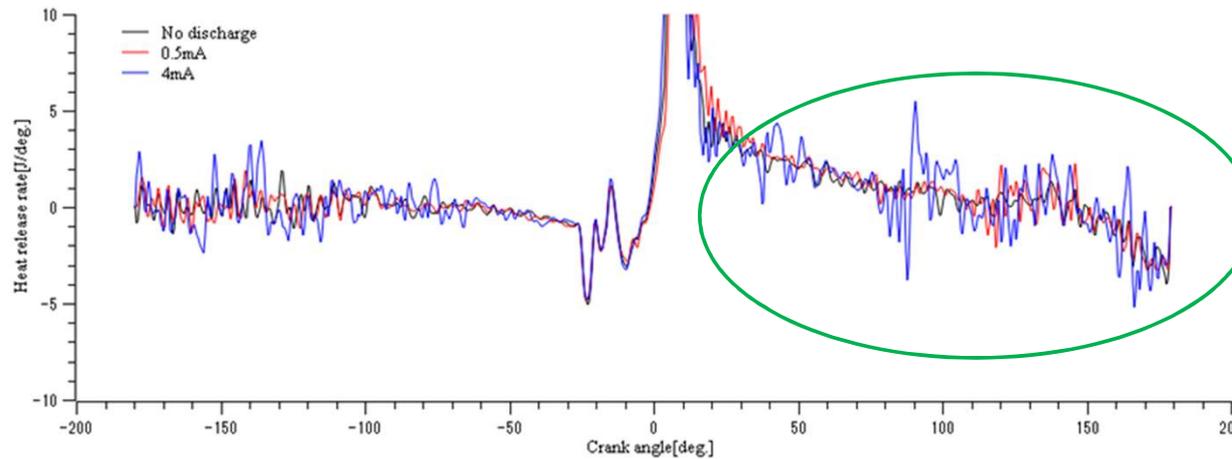
+最大筒内圧



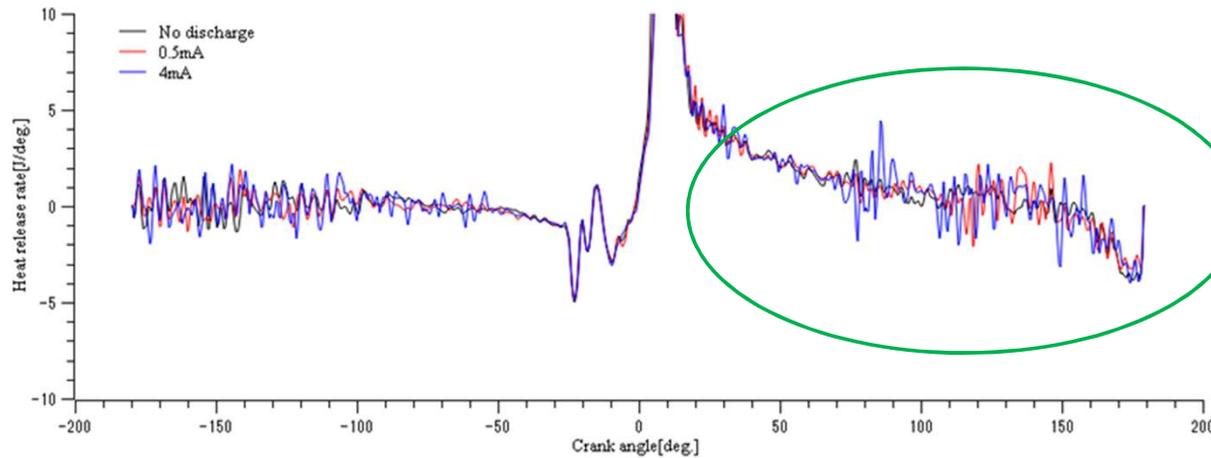
噴射時間2[ms] : 放電 ⇒ 燃焼性改善

噴射時間3[ms] : 放電 ⇒ 燃焼性悪化

4.2.3 クランク角度－熱発生率 (near 0[J])

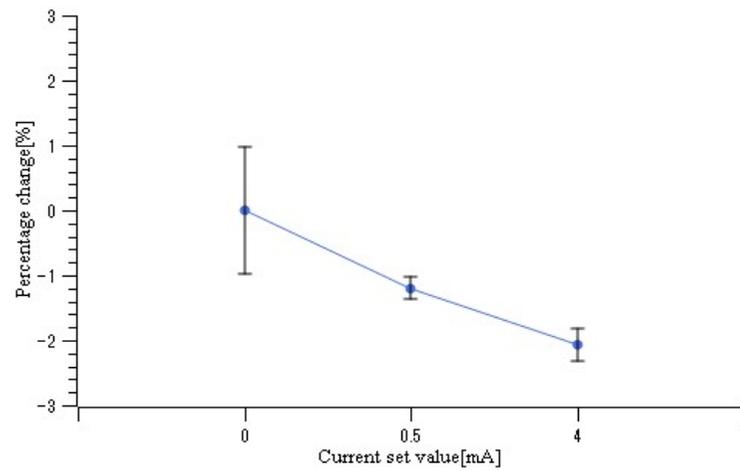
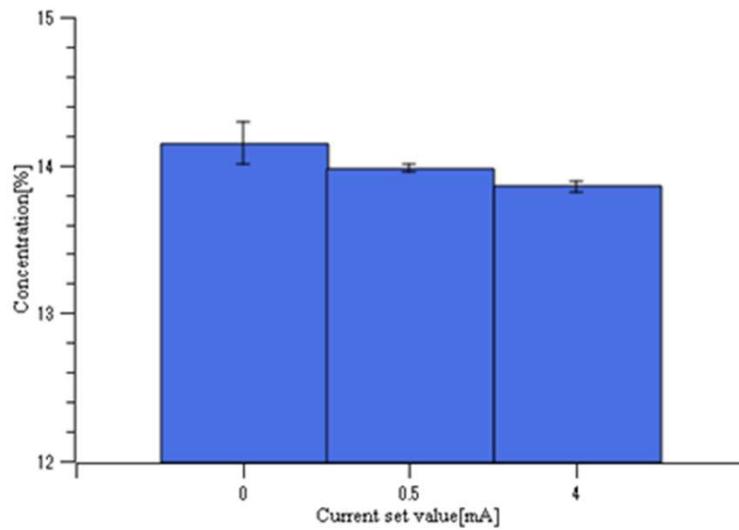


(a) Natural gas: 0.1[MPa], 2[ms]

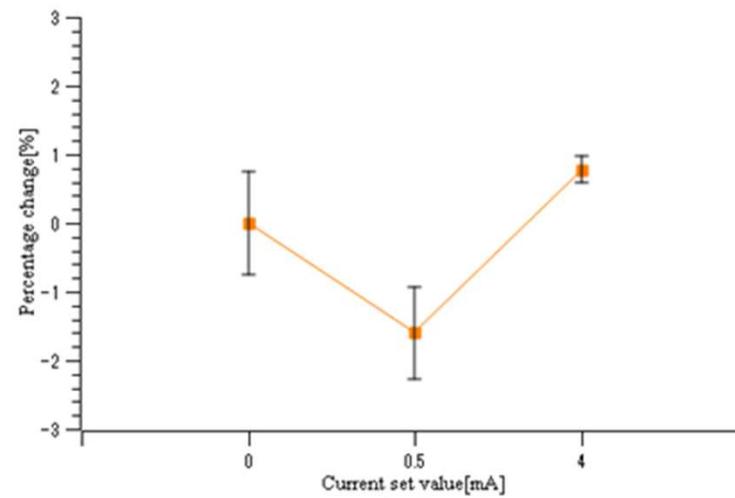
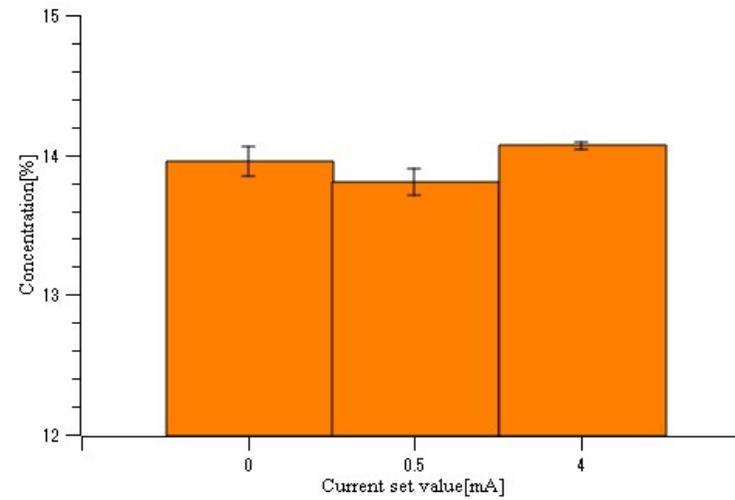


(b) Natural gas: 0.1[MPa], 3[ms]

4.2.4 残存酸素量

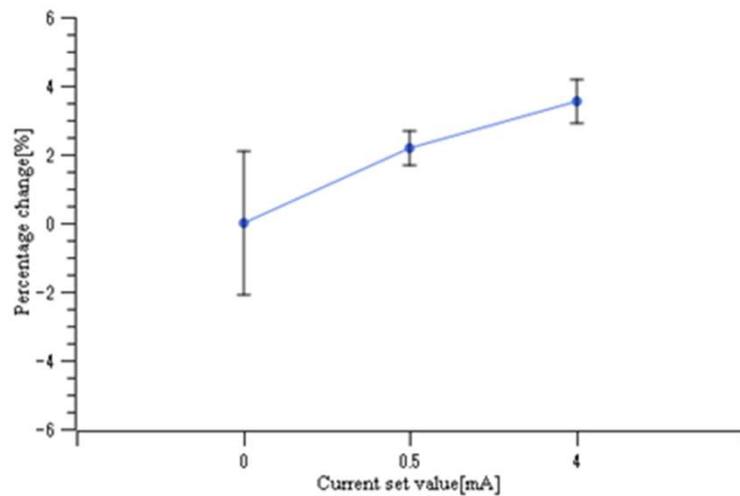
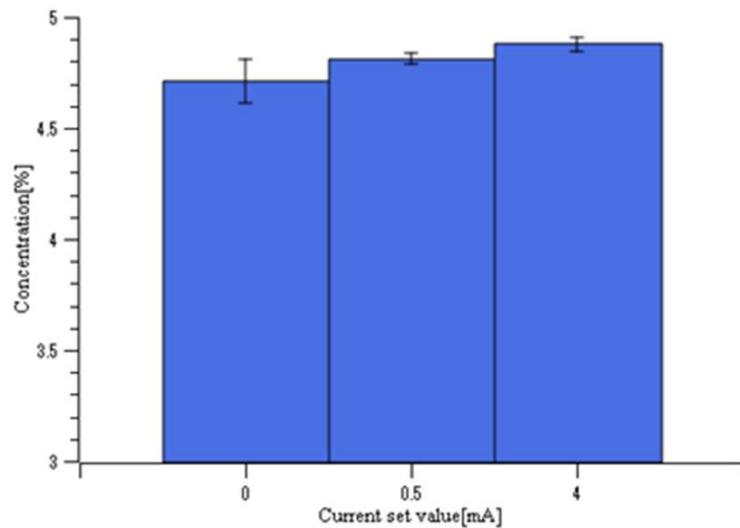


(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

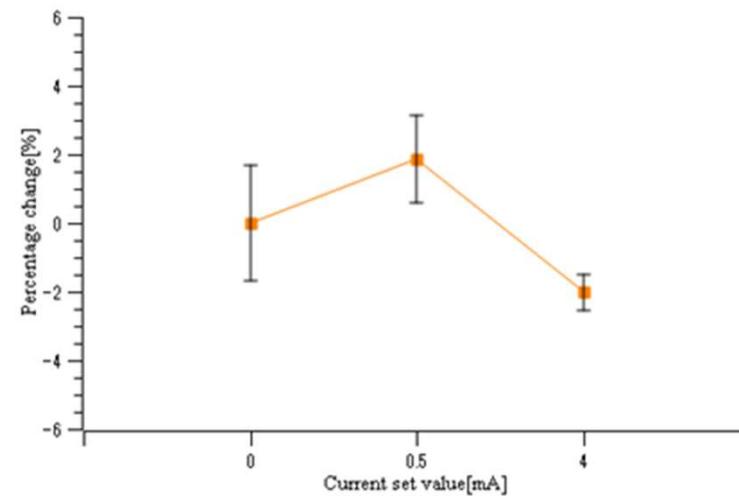
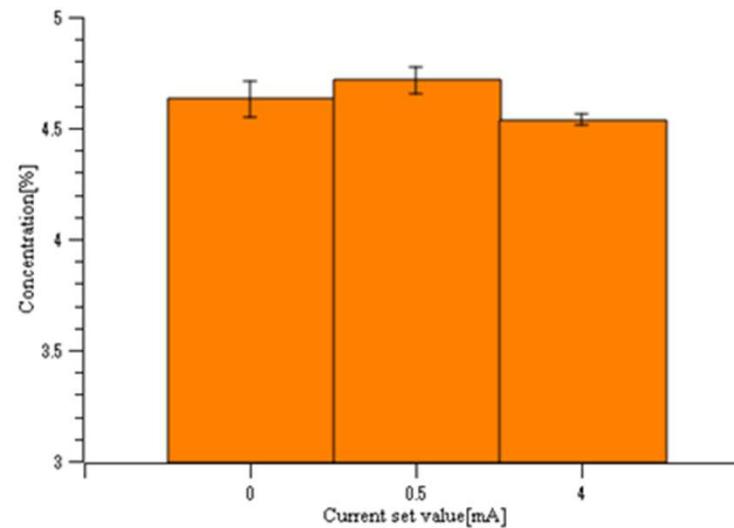


(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.5 CO₂

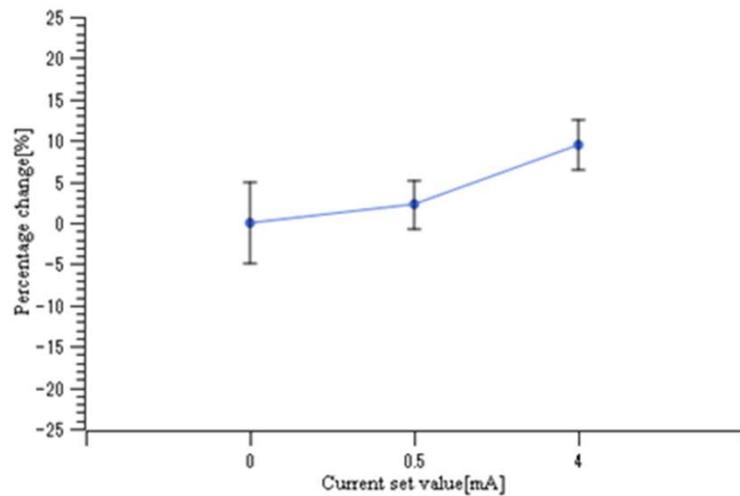
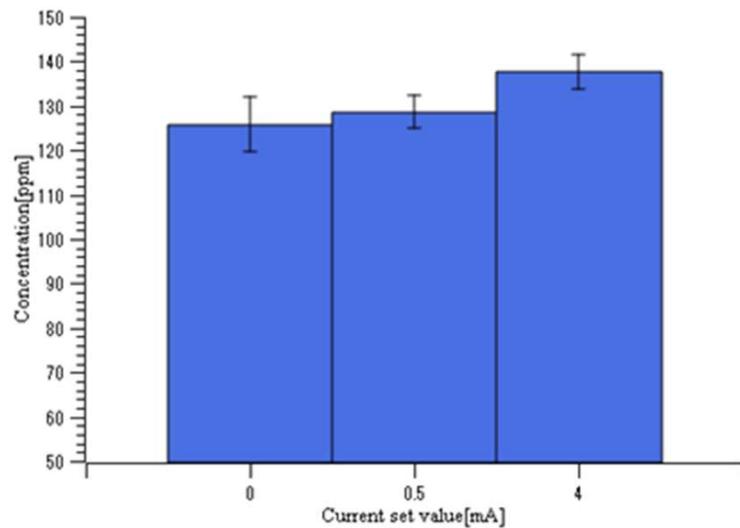


(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

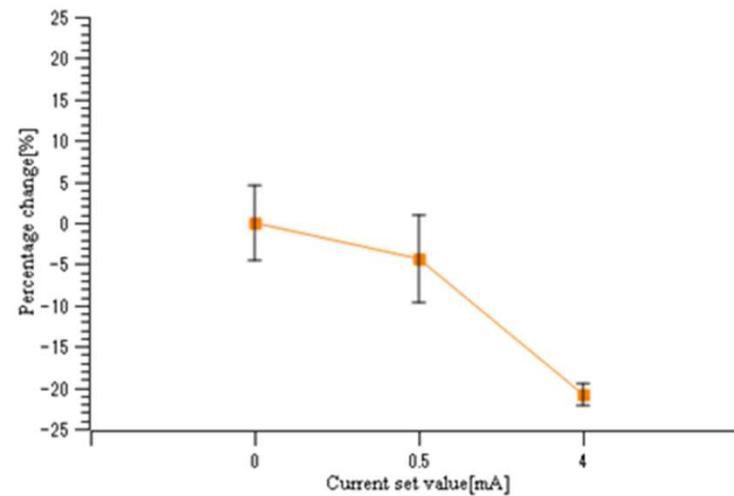
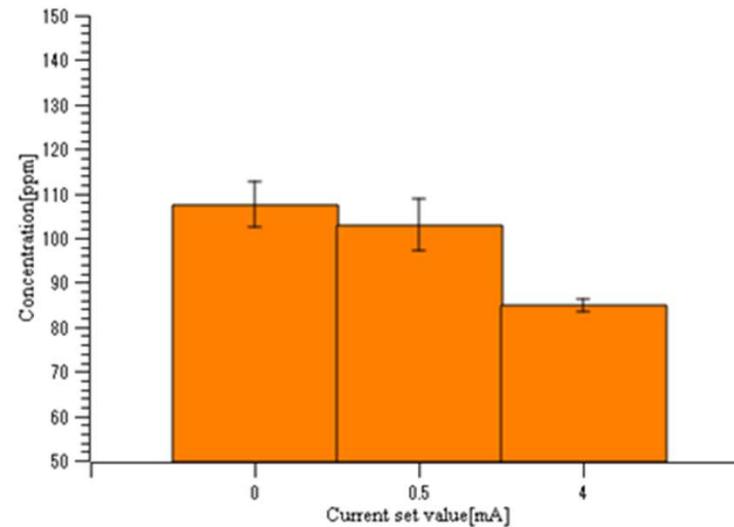


(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.6 NO

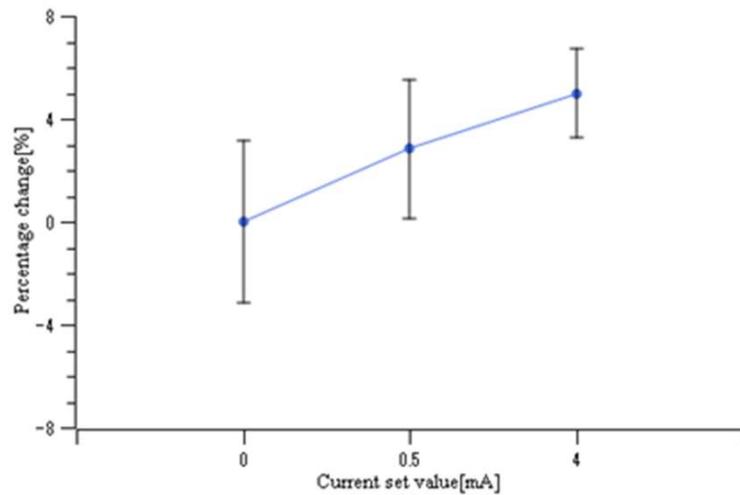
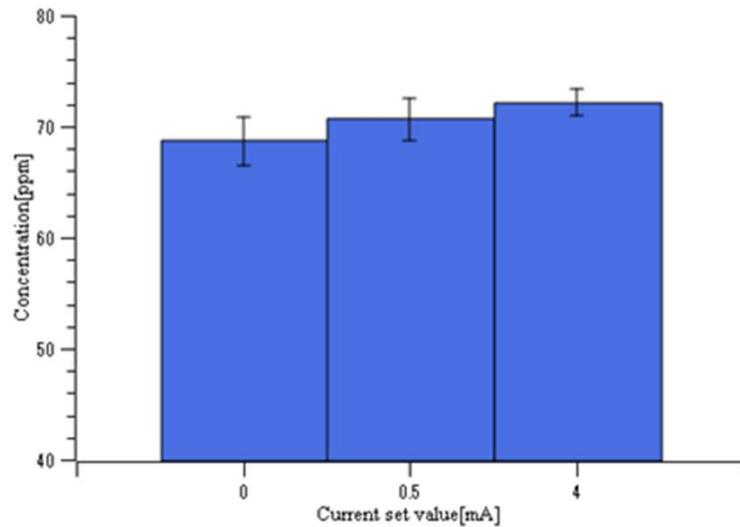


(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

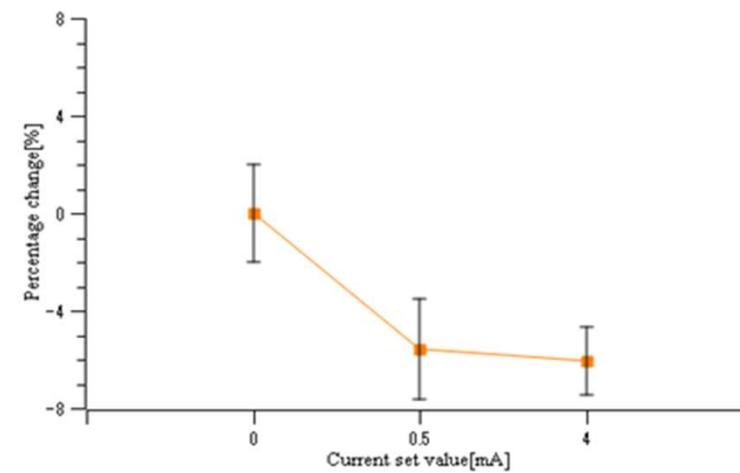
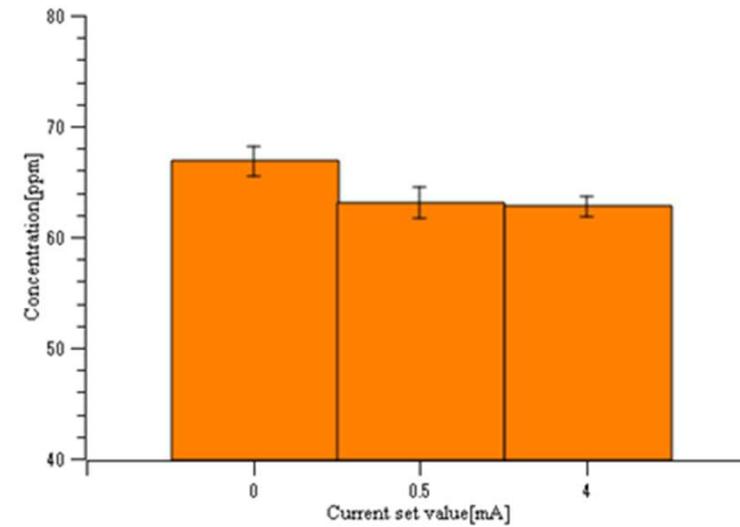


(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.7 NO₂

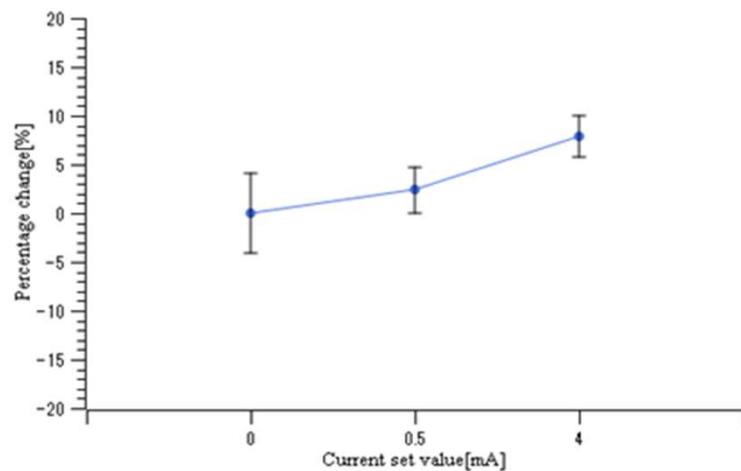
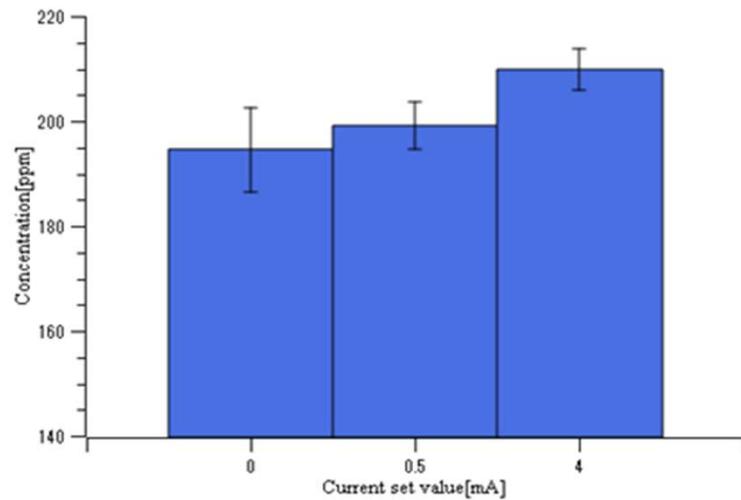


(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

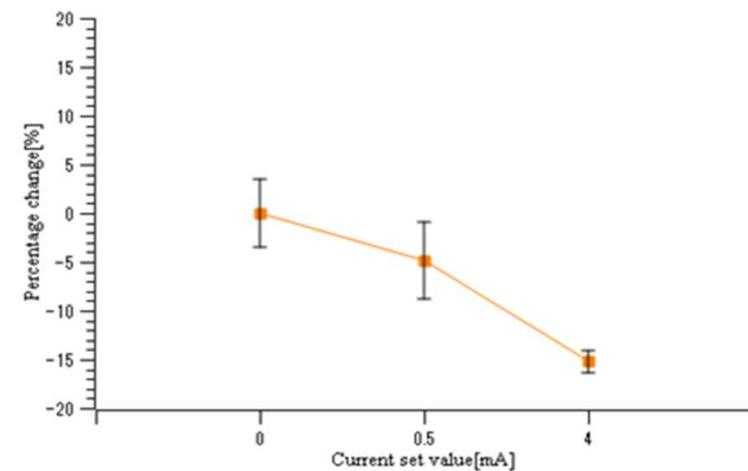
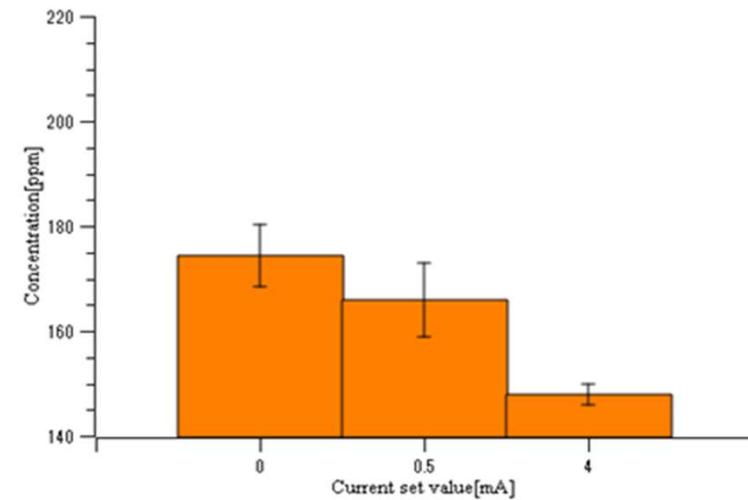


(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.8 NO_x

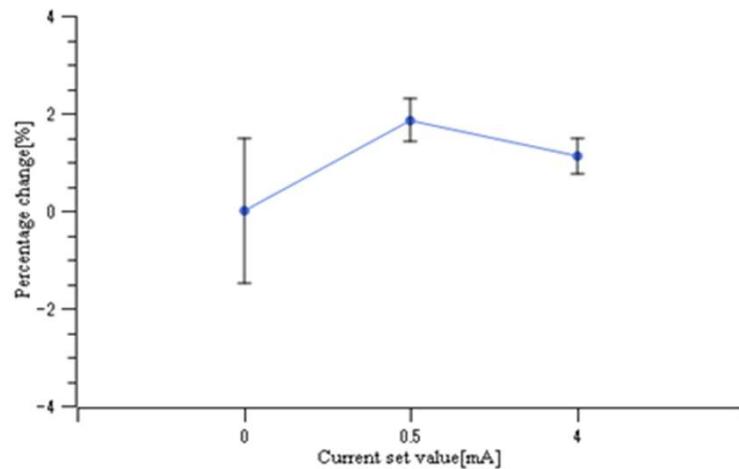
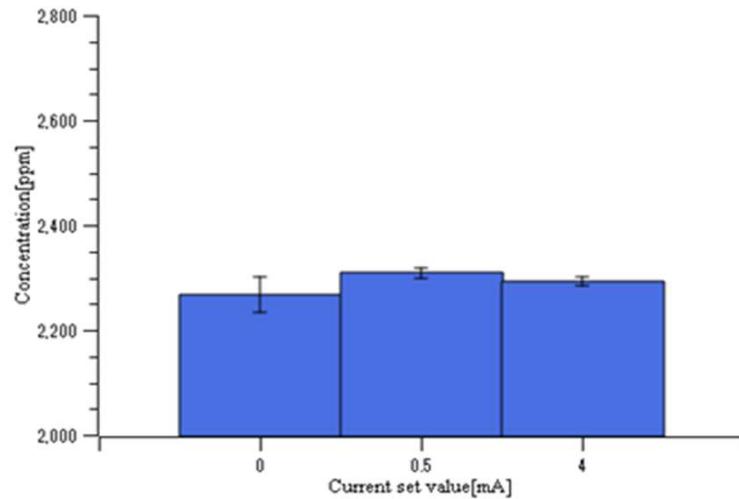


(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

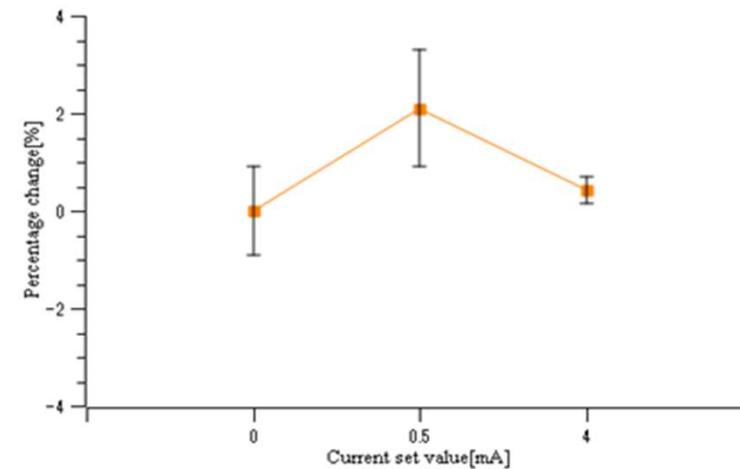
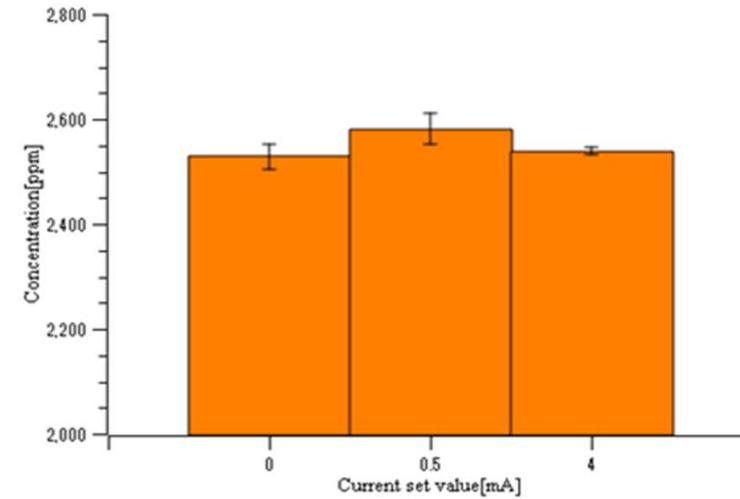


(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.9 CO

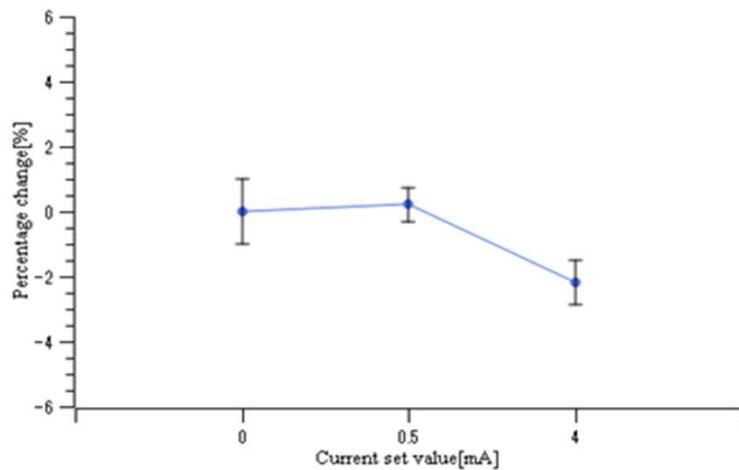
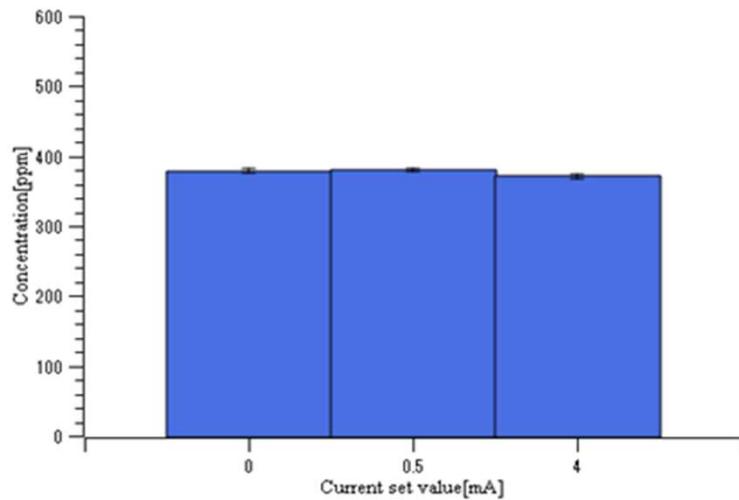


(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]

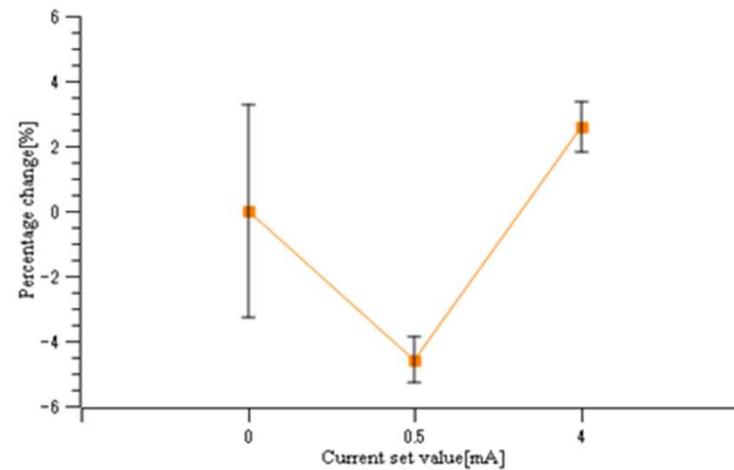
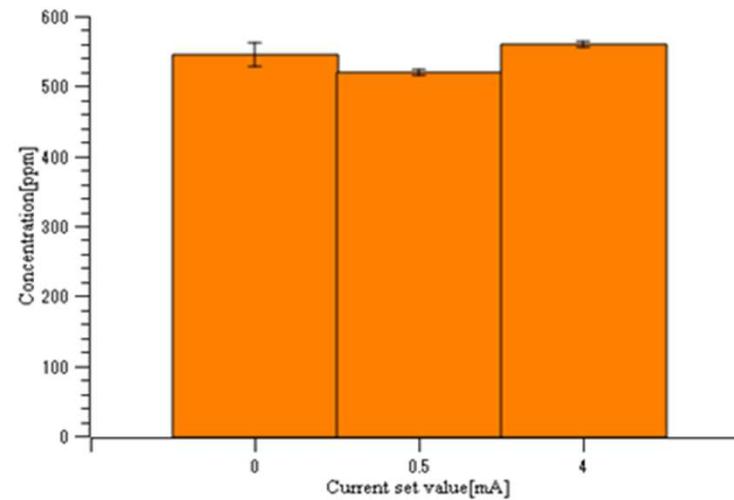


(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.10 HC



(a) Natural gas: 0.1 [MPa], 2 [ms]



(b) Natural gas: 0.1 [MPa], 3 [ms]

4.2.11 排ガス特性まとめ

放電なしと比較して

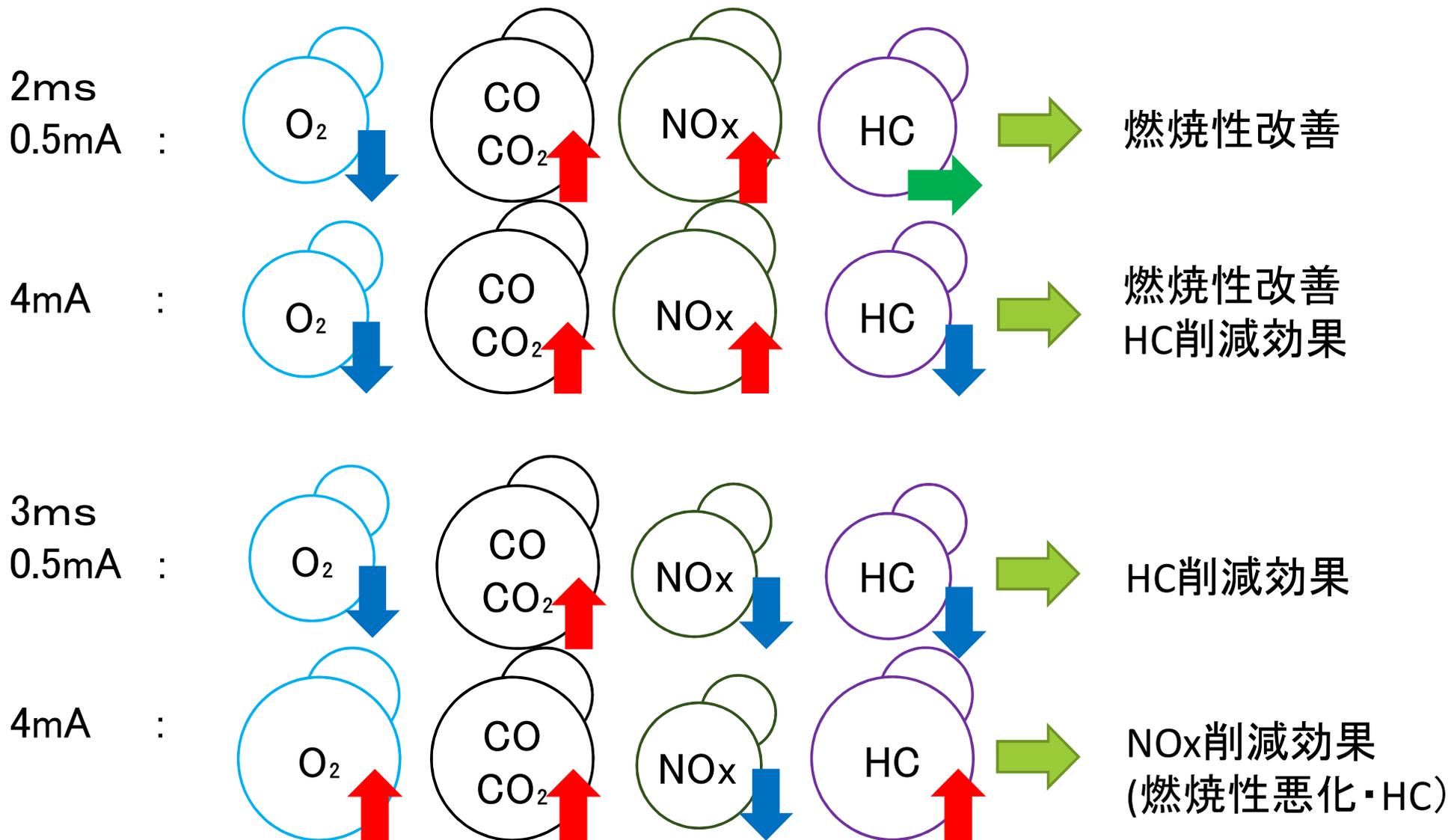


Table of contents

01

Introduction

- 1.1 背景
- 1.2 当研究室での先行研究
- 1.3 実験目的

02

Plasma assisted
combustion?

- 2.1 プラズマ支援燃焼の概念
- 2.2 放電電流と電圧の関係
- 2.3 プラズマ支援燃焼内での反応

03

Experimental
procedure

- 3.1 大気圧流れ放電実験
- 3.2 DFエンジン内の放電実験

04

Results
& discussion

- 4.1 大気圧流れ放電実験結果
- 4.2 DFエンジン内の放電実験結果

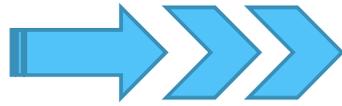
05

Conclusion

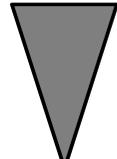
- 5.1 大気圧流れ放電実験まとめ
- 5.2 DFエンジン内の放電実験まとめ
- 5.3 今後の方針

5.1 大気圧流れ放電実験まとめ

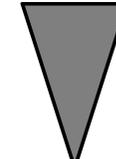
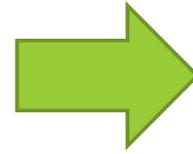
I.



流速

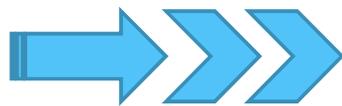


ストリーマ放電

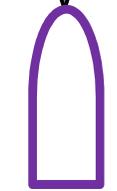
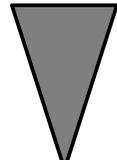


変化なし

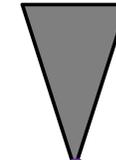
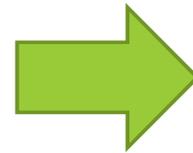
II.



流速



アーク放電

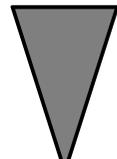


不安定

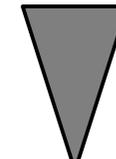
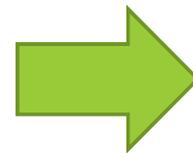
III.



流速



スパーク放電



安定？

5.2 DFエンジン内の放電実験まとめ

I. 最大筒内圧

- ・噴射時間2ms : 放電 ⇒ 増加
- ・噴射時間3ms : 放電 ⇒ 減少

熱発生率

- ・噴射時間2ms : 4mA ⇒ 進角・増加
- ・噴射時間3ms : 放電 ⇒ 遅角・減少



噴射時間2[ms] : 放電 ⇒ 燃焼性**改善**

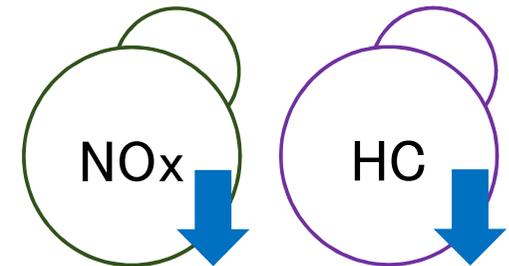
噴射時間3[ms] : 放電 ⇒ 燃焼性**悪化**

II. 排気行程での放電・熱発生率の**乱れ**

⇒ 放電による反応 + 燃焼による強い圧力場の影響

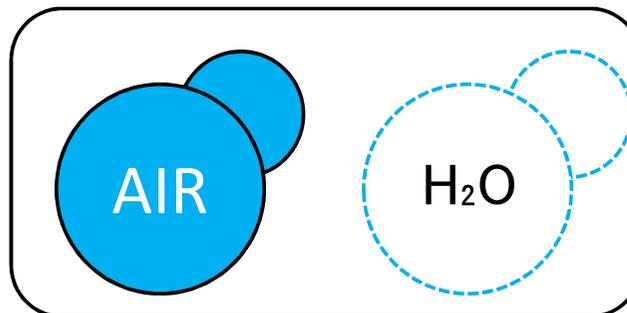
III. 排気特性

- ・噴射時間2ms : 4mA ⇒ HC削減効果
- ・噴射時間3ms : 0.5mA ⇒ HC削減効果
- 4mA ⇒ NOx削減効果(燃焼悪化+HC)



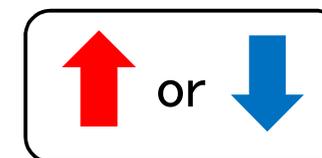
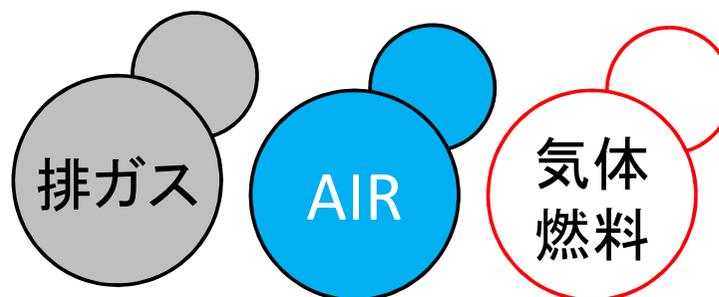
5.3 今後の方針

- I. 試行回数を重ねる
- ・大気環境の変化
 - ・電極や電源の変化
 - ・軽油運転との比較

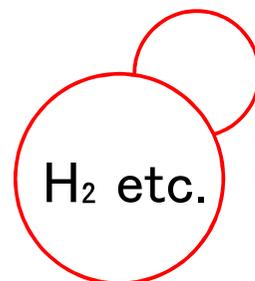


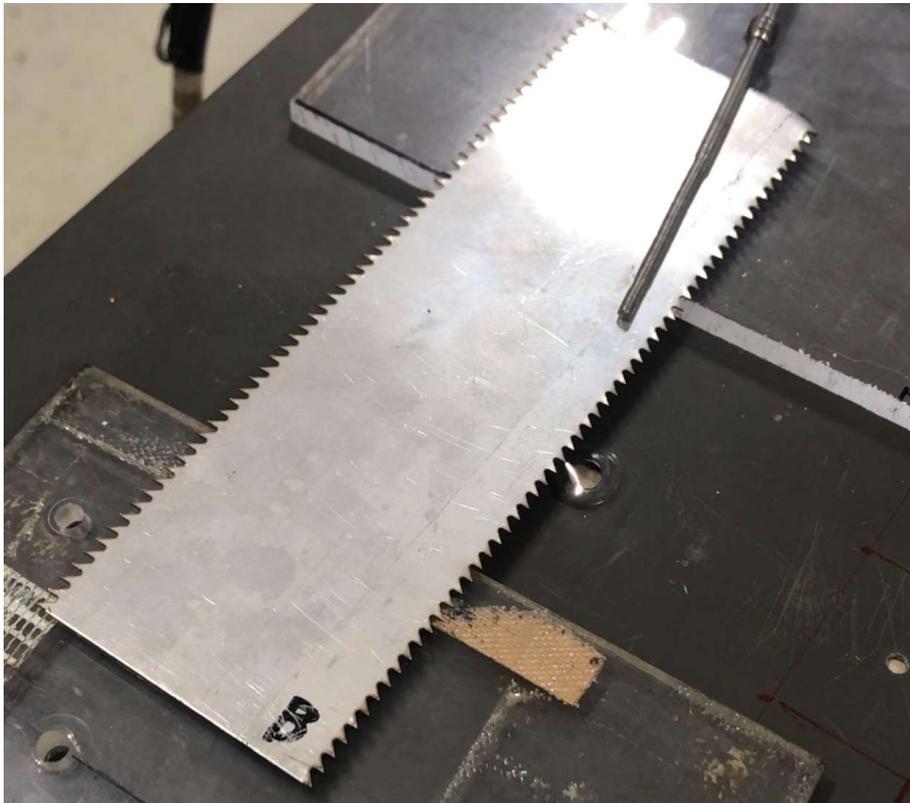
Diesel Oil

- II. 圧力容器内での放電実験

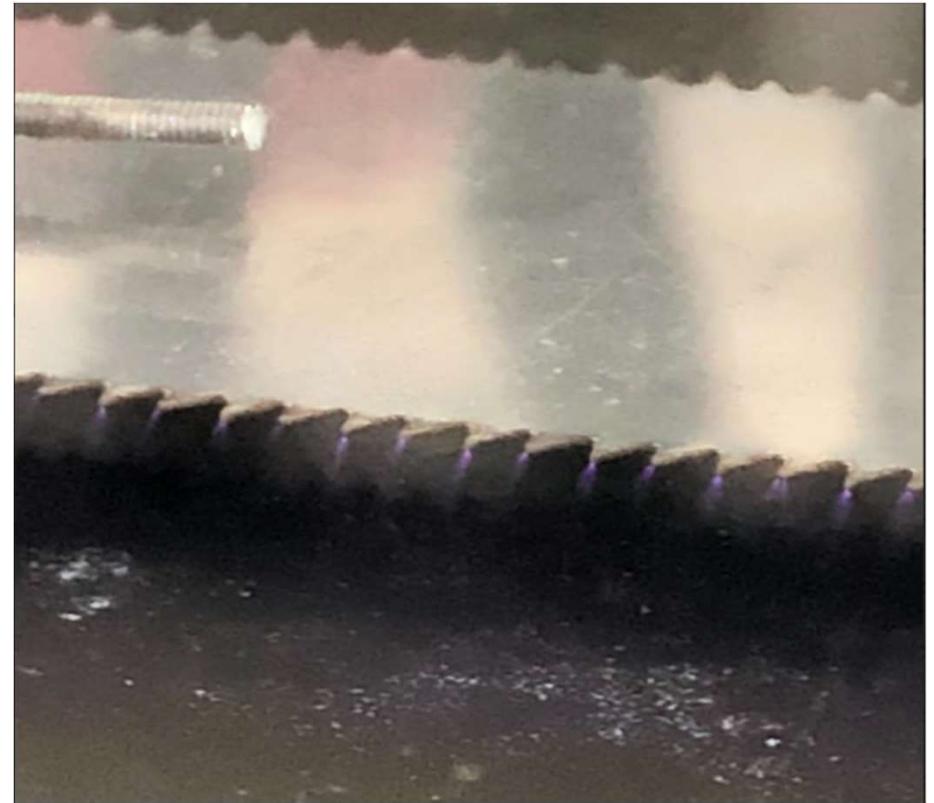


- III. 様々な燃料への適用





(a) 2[mm] : Distance between the electrodes , 0.5[mA]



(b) 10[mm] : Distance between the electrodes , 0.5[mA]

5.4 噴射量(参考)

噴射量(水上置換) : 29°C 湿度78% 1013hPa

・噴射時間2ms : 1回あたり6.2ml

・噴射時間3ms : 1回あたり8.7ml

→発熱量の観点

軽油単体(2000rpm, 1.5kW) = 天然ガス単体(1回あたり15ml)

噴射量(マスフローメーター) : 10°C 湿度57% 1005hPa

・噴射時間2ms : 1回あたり7.98l/min

・噴射時間3ms : 1回あたり11.3l/min

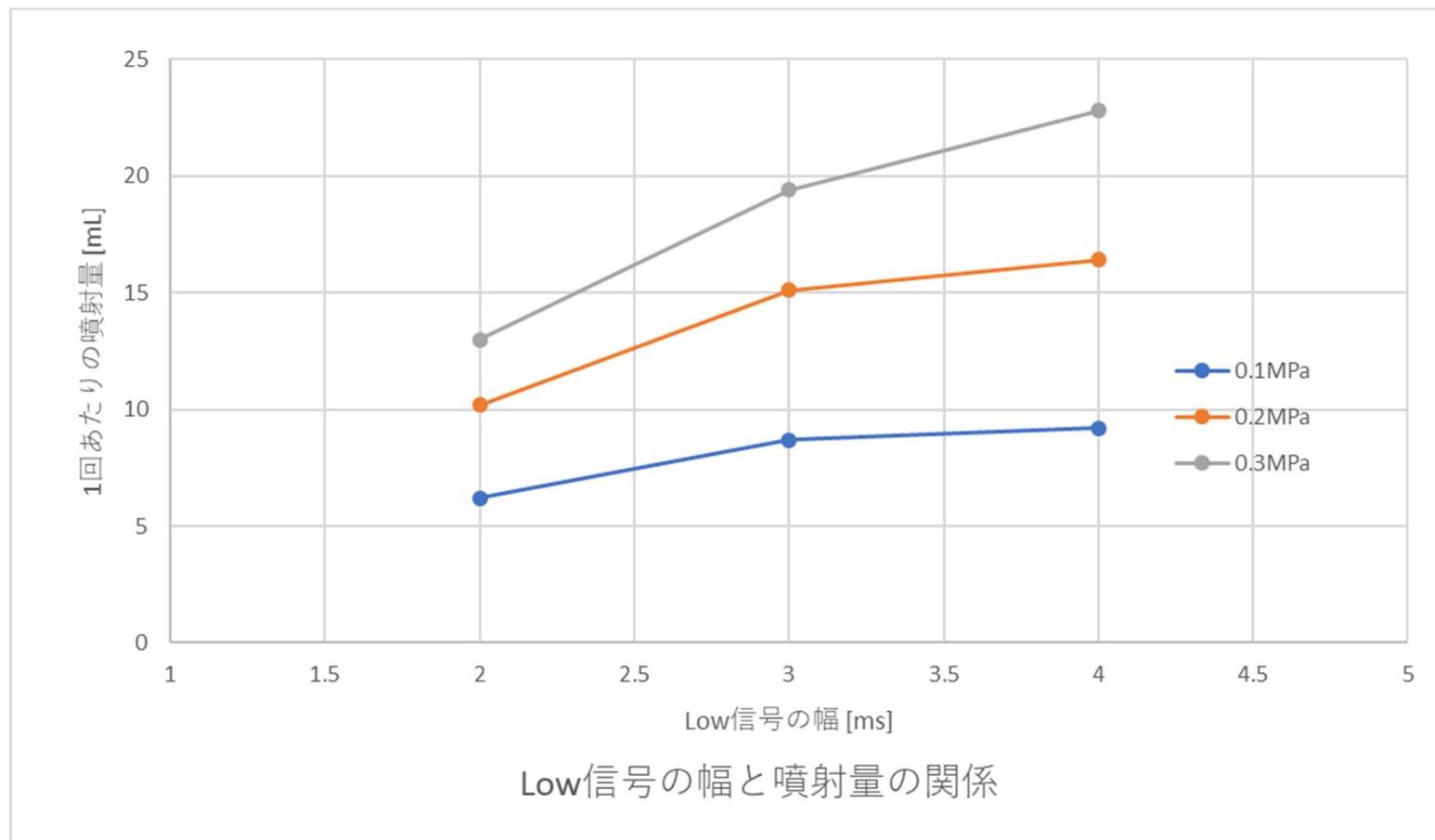
→実際より**少なく表示**

吸気量 : 10°C 湿度57% 1005hPa

オリフィスより、412L/min

5.4 噴射量(参考)

噴射量(水上置換) : 29°C 湿度78% 1013hPa



ご清聴、ありがとうございました