

ディーゼルエンジンによるクリーンな世界をめざして

神戸高専機械工学科 燃焼工学実験室 エンジンチーム

◎廣澤謙弥 渡邊紳之介

1 研究背景

ディーゼルエンジンは熱効率が高く、低回転域から安定したトルクが得られることから船舶や大型自動車等といった様々な分野で使用されている。また低質な燃料を燃焼させられることから、エネルギー資源の枯渇が叫ばれる現代において、様々な燃料を用いられる可能性は非常に魅力的といえよう。事実として近年では、低カロリーバイオマスガスなどの再生可能エネルギーを利用することに注目が集まっている。

その一方で排ガス中に含まれる硫黄酸化物や窒素酸化物が大気汚染や酸性雨の大きな原因となっている。そのため自動車の場合、人間の生活が密集する都市部を中心にディーゼルエンジンへの規制が行われてきた。一方で周辺環境への影響がわかりにくい海洋上では硫黄含有量が多い燃料が多用されてきたが、近年の環境への意識の高まりから、問題視され始めている。

2 研究目的

そこで本研究では、以下に示すような様々な吸気条件での燃焼を試行することで、排ガス特性と燃焼特性にどのような影響があるのか調べる。

(1)吸気へのコロナ放電の有無

以前、本実験室でのバーナー燃焼実験において火炎へのコロナ放電により、気体の活性化を行ったとき、図1に示すように火炎が反転する現象が見られた。そこで、機関のシリンダ内燃焼においても何らかの影響があるのではないかと考え、吸気にコロナ放電を行う。

(2)吸気への CH_4 ガス混入

CH_4 ガスは汚泥や生ごみからも発生する比較的安価なバイオマスガスであることから、再生可能エネルギーの一つとして注目されている。そこで本研究では、 CH_4 ガスを吸気に混入させ、燃料とともに燃焼させるデュアルフューエル燃焼を行う。

(3)吸気の加熱

(1)のコロナ放電は、空気に対して電気ので気体を荷電させるの活性化を図ったものである。ほかに、空気の活性化の方法として、加熱により分子の運動を活発化させる方法が考えられる。この吸気の加熱とほかの吸気に対する操作の関連性についても調べるため、吸気の加熱を行う。



図 1-a 燃料: CH_4

コロナ放電
無
↓
有

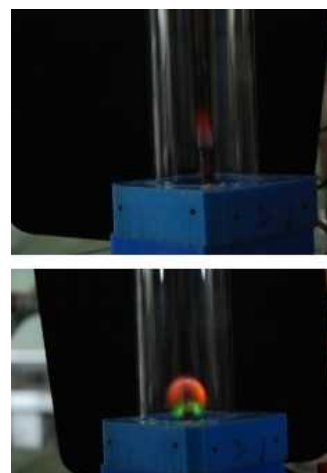


図 1-b 燃料: H_2

図 1 コロナ放電による火炎の反転

3 実験装置

以下のような実験装置を用いて、実験を行う。

1)使用機関

図 2 に示す、ヤンマー製 2 気筒 4 ストロークディーゼルエンジンを用いる。ただし、機関実験の慣例に従い、1 気筒のみで運転する。諸元については表 1 のとおりである。

表 1 使用機関諸元



図 2 使用機関外観

型式	Yanmar 2TL
気筒数	2
内径 × 行程 [mm]	95 × 115
圧縮比	18.6
最大出力 [kw / rpm]	13.2 / 1800
燃料噴射時期	10° ~12° before TDC
燃料噴射圧力 [MPa]	16

2)熱風発生機

八光製熱風発生機 HAP3050 を用いて、機関へ空気を送る。諸元については表 2 のとおりである。風量は、ファンの回転数により制御する。

表 2 熱風発生機諸元

型式	HAP3050
吐出気体温度範囲[°C]	常温+15~300
風量調整範囲[m³/min]	1.7~3.5
総容量[kW]	6.9

3)コロナ放電装置

図 3 に示すコロナ放電装置を用いて吸気の活性化を行う。これにより、気体電子のエネルギー準位が高くなる、O₃が発生するといった、効果がある。図 4 に示すような鋸刃付平行平板の尖頭部で放電を行う。



図 3 コロナ放電装置外観

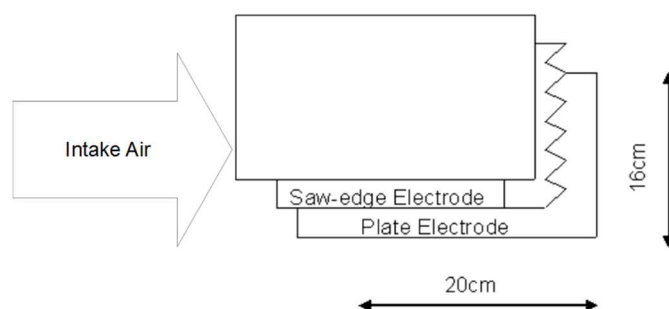


図 4 コロナ放電装置構造

4 実験条件

下図 5 のように機関に熱風発生機、コロナ放電装置、CH₄ガスボンベ及びその流量計を接続し、機関を運転する。この時の運転条件²⁾と測定項目は次の通り。

1) 運転条件

- (1)機関回転数:1000[rpm]
- (2)水温 :40±3[°C]
- (3)送気量 :500[L/min]

2) 測定項目

- (1)排気ガス : NO_x・O₂・CO₂濃度およびPM 量
- (2)軸動力
- (3)筒内圧力

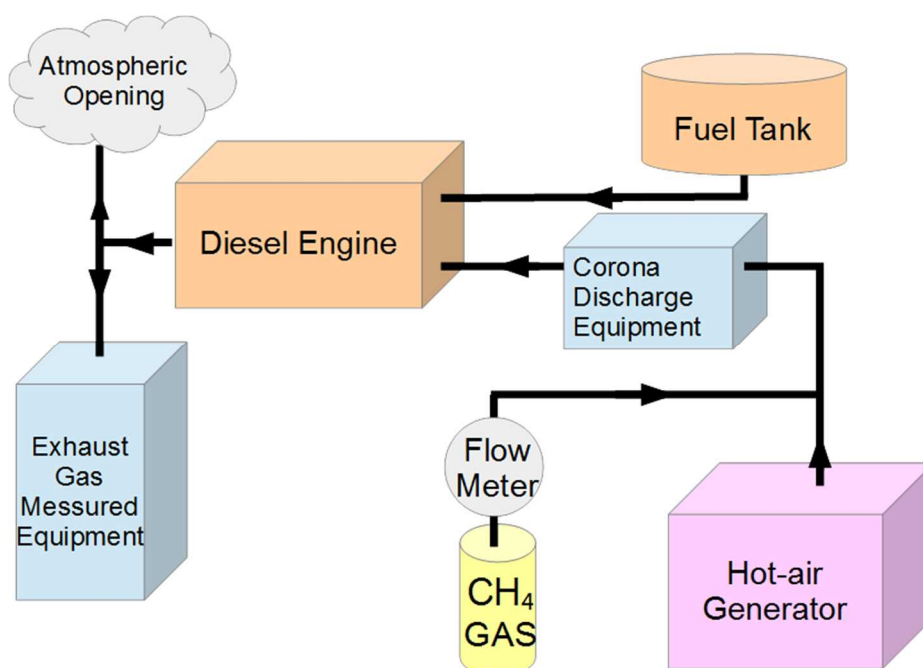


図 5 実験装置構成

5 予備実験 1<O₃濃度測定>

1) 実験概要

実験に先立ち、コロナ放電電圧、方向および吸気温度と吸気中の O₃濃度の関係を調べた。実験条件化の運転状態において、図 6 中の Corona Discharge Equipment(コロナ放電装置)直後より吸気を取り出し、O₃濃度測定は図 7 に示すオゾン濃度計(DILEC 製 MODEL1300)にて測定する。

吸気温度は常温吸気として 35~40[°C]、高温吸気として 90[°C]で行った。



図 6 オゾン濃度計 DILEC MODEL1300

2) 実験結果

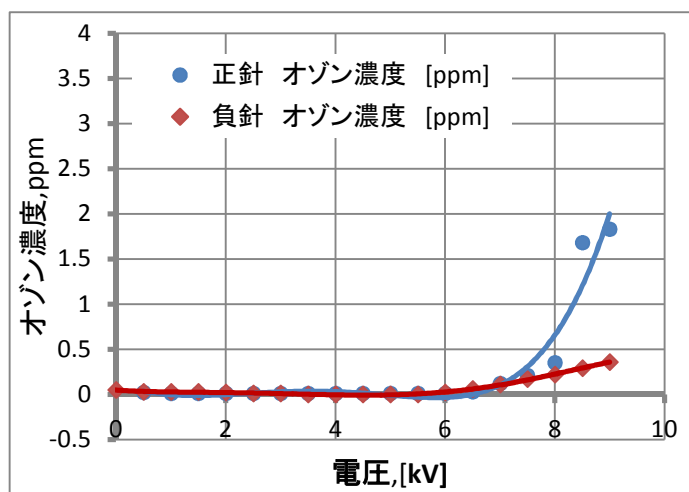


図 7 オゾン濃度(常温吸気)

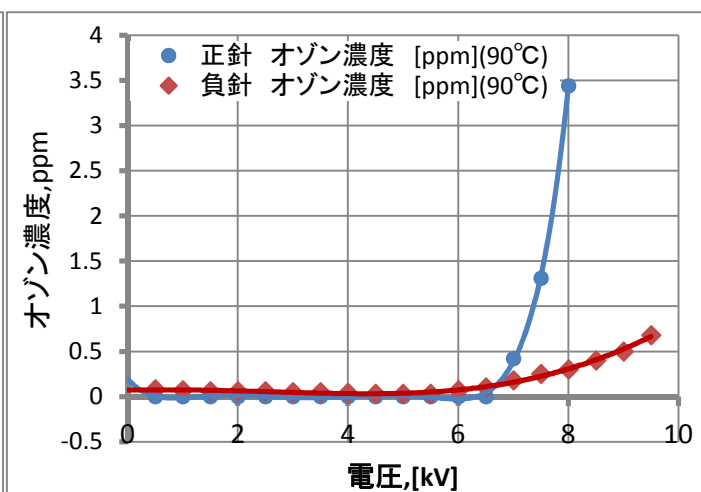


図 8 オゾン濃度(高温吸気)

図 7 の常温吸気、図 8 の加熱吸気ともに、 O_3 濃度が正針については 7.0[kV]、負針は、6.0[kV] 程度から上昇を始めていることがわかる。また、加熱することにより、正針負針ともに大きく O_3 濃度が増大することがわかる。電圧の上限については、電源装置での電流値の上限に達した時点まで測定した。これにより、加熱した場合、正針では電流値が抑えられ、負針では電流値が増大することがわかる。

6 予備実験 2<コロナ放電および CH_4 ガス混入による影響>

1) 実験概要

予備実験 1 の結果をもとに、コロナ放電および CH_4 ガス混入³⁾により、排気ガス成分および軸動力に、どのような影響が出るか調べた。なお、吸気温度は 90[°C]で行った。コロナ放電の電圧は放電なし及び、正負ともに 4.0[kV]と 8.0[kV]で行う。なお 4.0[kV]は O_3 が発生しない状態、8.0[kV]は O_3 が多く発生している状態として選定した。排ガス成分 ($NO_x \cdot O_2 \cdot CO_2$ 濃度) は、図 9 に示す testo 製 testo340 により分析する。



図 9 testo340

2) 実験結果

図 10 に NO_x 濃度、図 11 に軸動力、図 12 に O₂濃度、図 13 に CO₂濃度を示す。

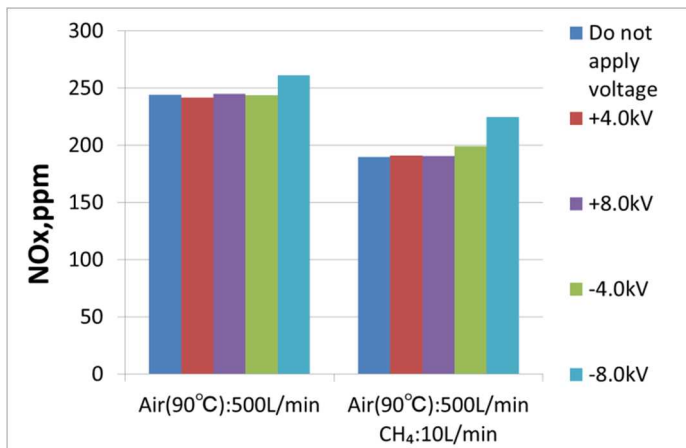


図 10 NO_x 濃度(予備実験 2)

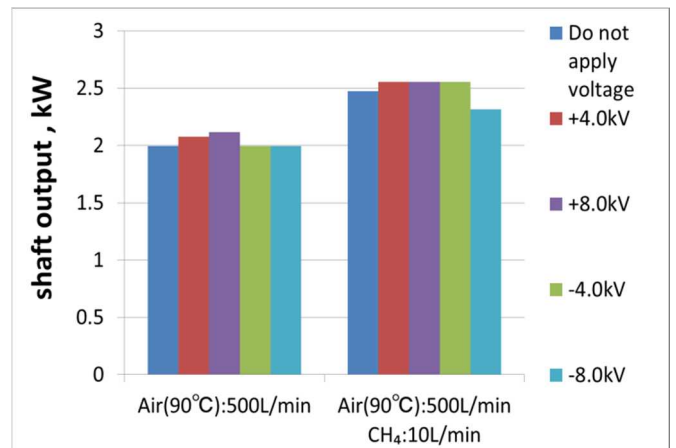


図 11 軸動力濃度(予備実験 2)

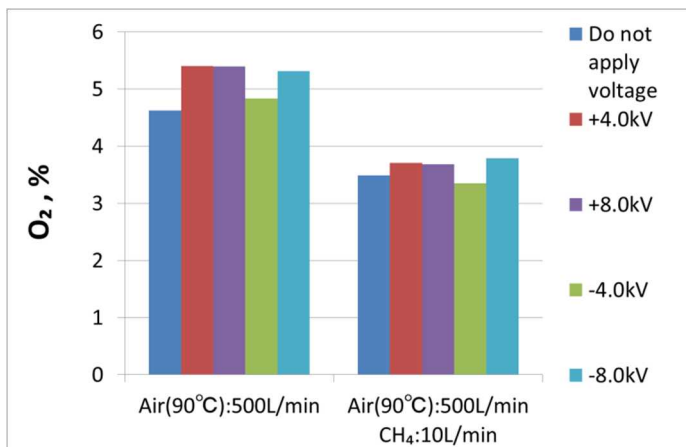


図 12 O₂濃度(予備実験 2)

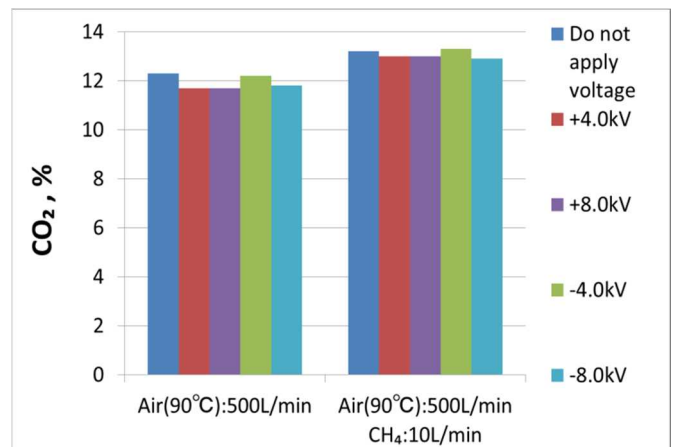


図 13 CO₂濃度(予備実験 2)

CH₄ガス混入により、軸動力が増大している。これは、CH₄ガスは有機化合物であり燃料としての役割も果たすからだ。その一方で、NO_x 濃度および O₂濃度が低下し、CO₂濃度が増加している。

正針コロナ放電では、電圧の高低、つまり O₃の有無が各値に大きく影響することはなかった。全体としては、NO_x 濃度が大きく上昇することはない、O₂濃度および軸動力は上昇し、CO₂は低下した。

負針コロナ放電では、ほぼすべてのパラメータにおいて-4.0[kV]と-8.0[kV]の間に大きな差があった。CH₄ガスを混入しない場合は、NO_x 濃度が-8.0[kV]時にのみ上昇、軸動力は変化なし、O₂濃度は電圧の上昇につれて上昇、CO₂濃度は電圧の上昇につれて低下した。また CH₄ガスを混入した場合は、NO_x 濃度が電圧の上昇とともに上昇、軸動力は-4.0[kV]時に上昇する一方で-8.0[kV]時に低下、O₂濃度は-4.0[kV]時に低下する一方で-8.0[kV]時に上昇、CO₂濃度が 4.0[kV]時に微増する一方で-8.0[kV]時に低下した。

7 本実験

1) 実験概要

上記の予備実験 2 において、負針電圧の高低により各種のパラメータに違いが出ることがわかった。また、送気温度の高低による O₃濃度への影響が予備実験 1 によりわかっている。そこでこれらに注目し、以下の(1)～(8)のような条件下で 3 の測定項目について調査する。

- (1) 常温強制送気のみ実施
- (2) 常温強制送気に-4.0[kV]の電圧をかける
- (3) 常温強制送気に-8.0[kV]の電圧をかける
- (4) 常温強制送気に CH₄ ガスを混入する
- (5)～(8) (1)～(4)の送気温度を 90[°C]に加熱する

また筒内圧力測定のため機関内部にひずみ計を設置し、その電気信号を図 14 の KYOWA 製センサインターフェイス PCD-300B で経由し PC でデータを取得する。そのほかに、図 15 に示す RION 製パーティクルカウンタ KC-01C により、排気管内の PM 数を測定する。



図 14 センサインターフェイス PCD-300D



図 15 パーティクルカウンタ KC-01C

2) 実験結果

(1) NO_x 濃度

下図 16 に各実験条件下での NO_x 濃度を示す。

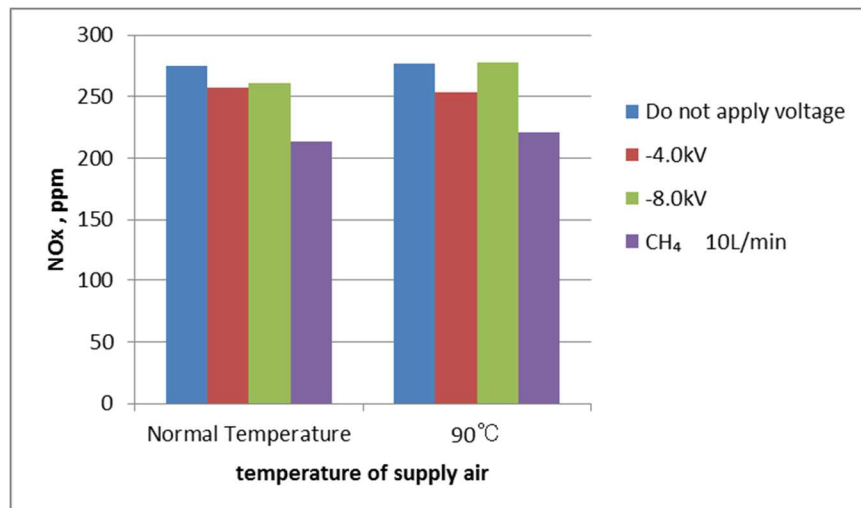


図 16 本実験 NO_x 濃度

常温送気において、コロナ放電および CH₄ ガス混入の両方で NO_x 低減効果が見られた。このうち CH₄ ガス混入による低減効果が最も大きかった。コロナ放電については、O₃ の発生のない-4.0[kV]の方が-8.0[kV]よりも低減効果が大きかった。

加熱送気において、常温送気に比べ-4.0[kV]コロナ放電で濃度が数 ppm 微減したほかは、濃度が上昇する傾向に見られた。電圧印加なし及び CH₄ ガス混入については数 ppm 微増するにとどまったが、-8.0[kV]については、加熱強制送気のみ条件を上回るレベルまで上昇した。また、各実験条件間の関係性は、予備実験 2 と同様の傾向が見られた。

(2)軸動力

下図 17 に各実験条件下での軸動力を示す。

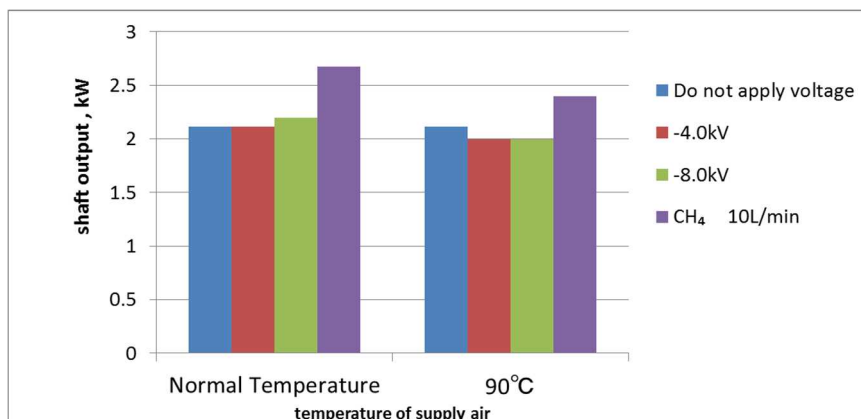


図 17 本実験軸動力

常温送気において、印加電圧がない場合と-4.0[kV]コロナ放電を行った場合では、軸動力には差がほぼ見られなかった。また、-8.0[kV]コロナ放電を行った場合、軸動力に増加が見られた。CH₄ガス混入については、CH₄の燃料的側面から、-8.0[kV]コロナ放電より大きく軸動力が上昇した。

加熱送気を行うことで、出力が全体的に低下する傾向が見られた。コロナ放電を行うことで印加電圧がない場合よりも、軸動力が低下した。印加電圧がない場合の軸出力は、送気の加熱によっては変化していない。また、CH₄ガス混入による軸動力向上効果は、送気の加熱によって効果が抑えられた。各実験条件間の関係性は、予備実験 2 と同様の傾向が見られた。

(3)O₂濃度および CO₂濃度

左下図 18 に各実験条件下での O₂濃度を、右下図 19 に各実験条件下での CO₂濃度を示す。

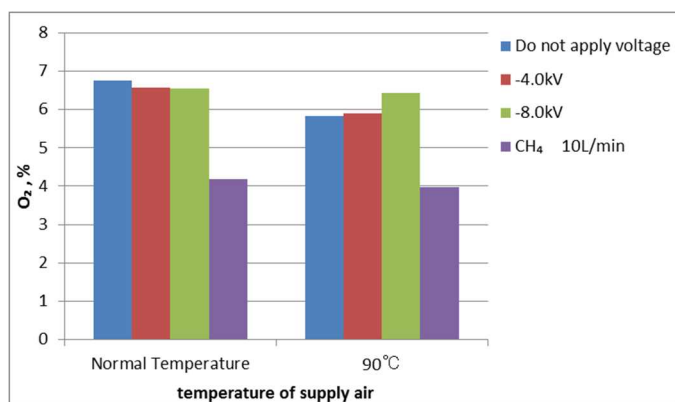


図 18 本実験 O₂濃度

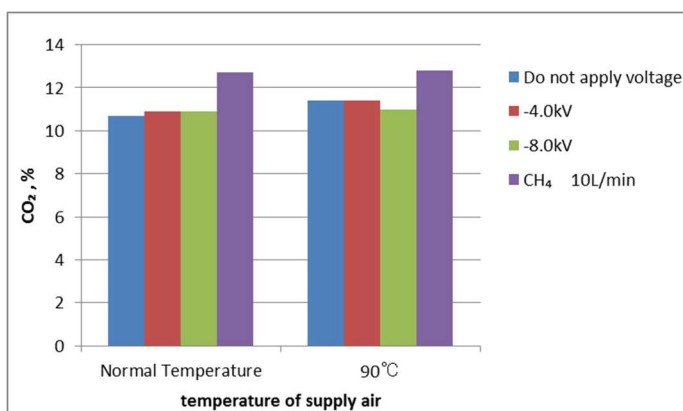


図 19 本実験 CO₂濃度

O₂濃度については常温送気において、印加電圧をかけることにより低下する傾向が見られた。また CH₄ガス混入を行うとそれよりも大幅に低下した。

一方、加熱送気においては、送気の加熱により全体としては O₂濃度が低下する傾向が見られた。しかし -8.0[kV] と CH₄ガス混入による低下は、ほかのものよりも小幅なものであった。コロナ放電に関しては、印加電圧がない場合から、印加電圧をかけるごとに O₂濃度が増加していく傾向が見られた。

(4)筒内圧力

図 20 に常温強制送気時の、図 21 に加熱強制送気時の筒内圧力を示す。なお、図中の「無噴霧状態」とは、常温自然吸気において燃料を噴射せず、ピストンの圧縮によってのみ圧力が上昇する状態のことである。

常温強制送気時において、コロナ放電により強制送気の場合に対して、筒内圧は大きく上昇した。しかし、電圧による圧力差はほぼなかった。CH₄ガス混入による影響は、強制送気の場合より筒内圧を上

昇させたが、コロナ放電によるものほどではなかった。

一方、送気の加熱によりでは、全体的に筒内圧力が低下した。筒内圧低下の程度は、CH₄ガス混入が最も小さく、強制送気の場合と-4.0[kV]コロナ放電が同程度で次に小さく、-8.0[kV]コロナ放電が最も大きな低下となった。これにより、常温強制送気時ではほとんどなかった-4.0[kV]コロナ放電と-8.0[kV]コロナ放電の筒内圧力差が 0.1MPa 程度に拡大した。

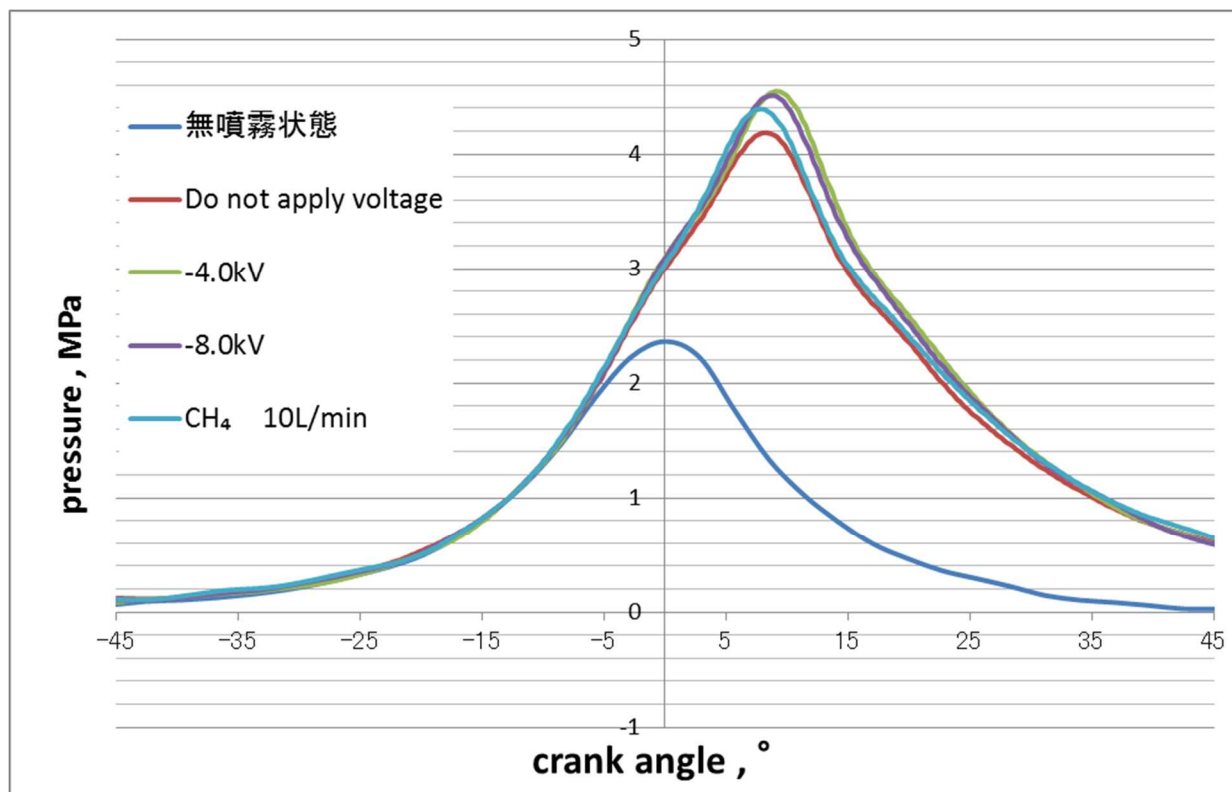


図 20 本実験 常温吸気状態筒内圧力

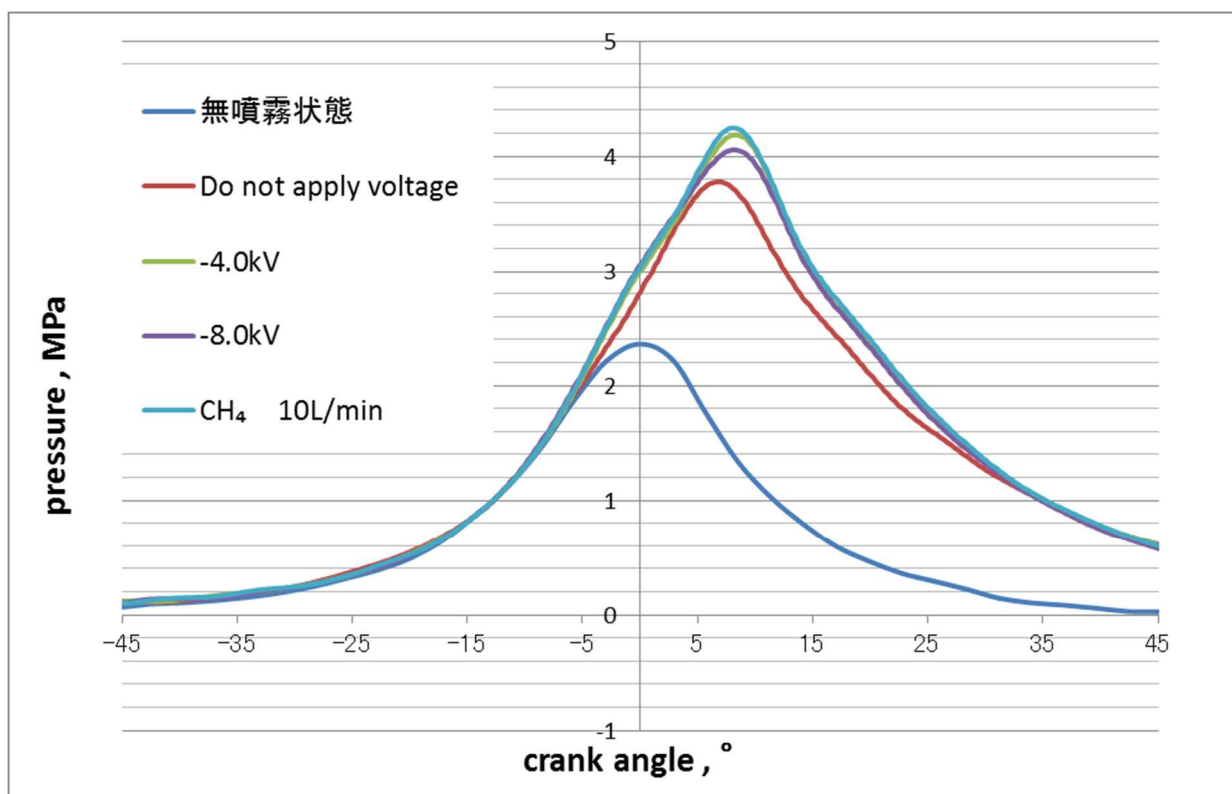


図 21 本実験 加熱吸気状態筒内圧力

(5)PM 量

図 22 に粒径が $0.3\mu\text{m}$ 以上の PM 量の総計を示す。

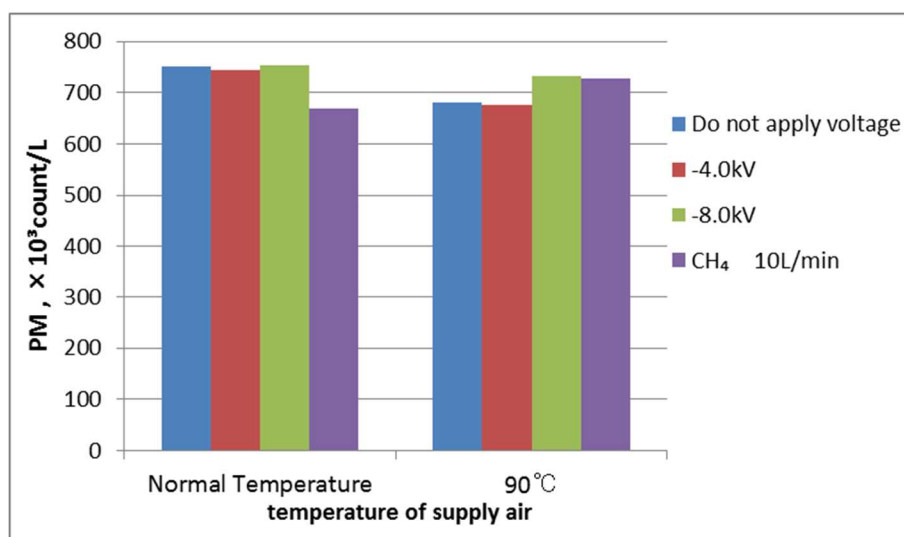


図 22 本実験粒径 $0.3\mu\text{m}$ 以上 PM 量

常温強制送気状態においては、-4.0[kV]コロナ放電で PM 量が微減しているが、コロナ放電により PM 量に大きな影響は見られなかった。 CH_4 ガス混入により、PM 量は低減できた。

一方で加熱強制送気により、強制送気のみの場合と -4.0[kV] コロナ放電時の PM 量は低減した。しかし -8.0[kV] コロナ放電では、低減の度合いが前者より小さくなった。さらに、 CH_4 ガス混入により、PM 量は増加した。

(6)PM 粒径の分布

ここで、PM の粒径は吸気への作用により変化するのだろうか。図 24 に PM の粒径をまとめた。このグラフは、ある粒径のプロット点の粒径から、次に大きい粒径のプロット点の粒径の間に含まれるサイズの PM の数を、小粒径側の粒径上にプロットし、グラフを平滑化したものである。また、図 23 の粒径 $0.2\sim 0.8\mu\text{m}$ の領域を図 24 に拡大する。

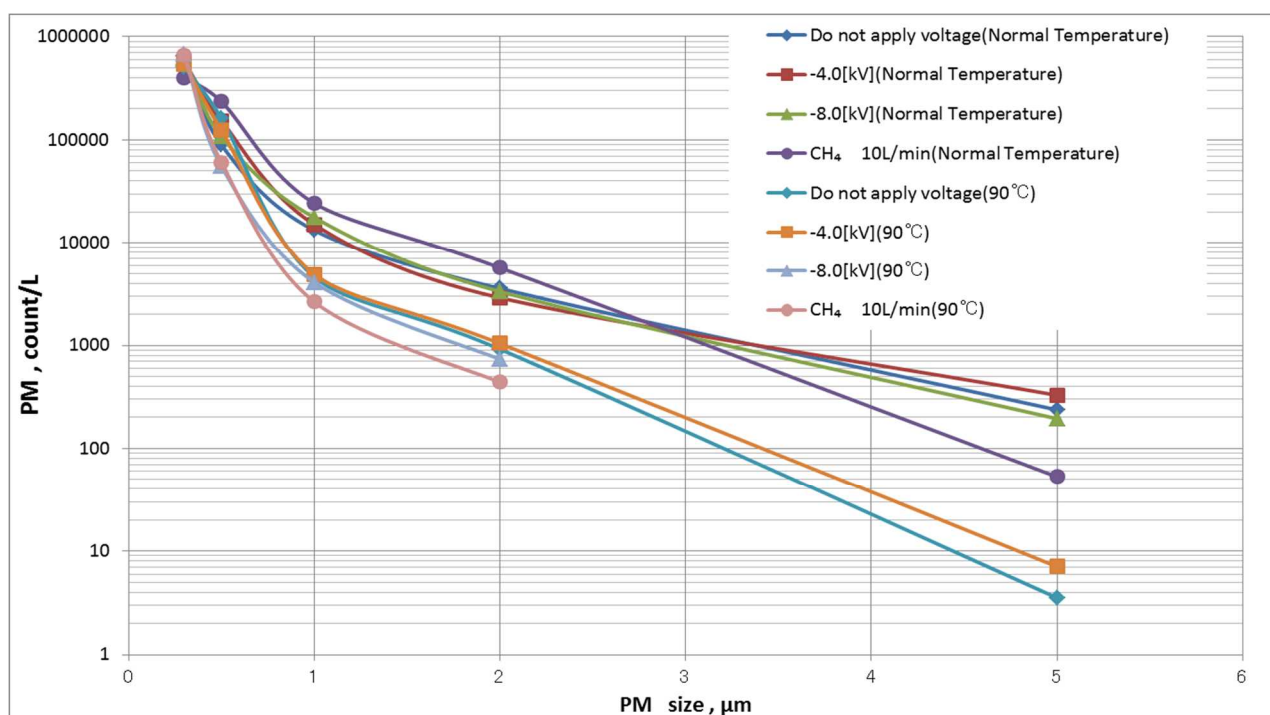


図 23 本実験 PM 粒径分布

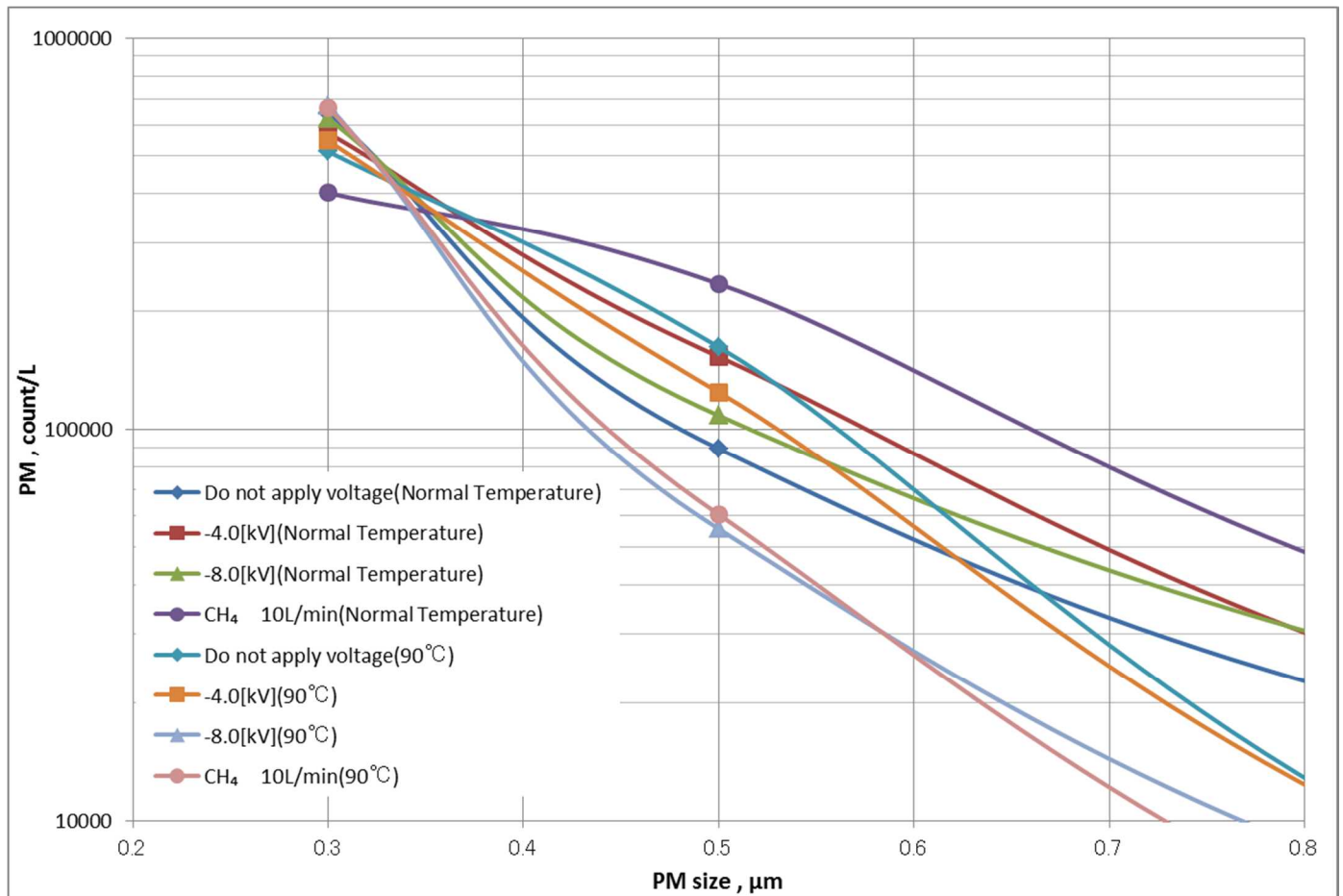


図 24 本実験 PM 粒径分布(拡大版)

図 23 に注目してみると、粒径 $1\mu\text{m}$ 以上の比較的大きな粒径域において、その PM 量が多いのは常温強制送気状態のものであった。その一方、加熱強制送気状態のものは、この粒径域では、PM 量が少なくなった。特に、加熱強制送気状態の-8[kV]コロナ放電および CH₄ ガス混入において、粒径 $5\mu\text{m}$ 以上のものは観測できなかった。

しかし、図 24 に注目すると、粒径 $1\mu\text{m}$ 未満の比較的小さな粒径域では、逆に加熱強制送気状態での実験における PM 量が増えていく傾向にあった。さらに、大きな粒径域で PM の検出量が少なかった、加熱強制送気状態の-8.0[kV]コロナ放電や CH₄ ガス混入実験の PM 量が、粒径域が小さくなるにつれ急激に増えていくこともわかる。

また、図 22 からこの 2 条件での総 PM 数が多いことがわかる。このような点から、吸気条件の変化により、PM の全体量には大きな変化は無く、大きな粒子が微細化されているのではないかと考えられる。

8 まとめ

本実験において、高温での送気を行った狙いは、コロナ放電による吸気活性化を補助することである。以下のように結果をまとめる。

- (1) オゾン O₃ の発生しない-4.0[kV]コロナ放電では、常温吸気での NO_x の低減及び PM の大粒径化、高温吸気での総 PM 量低減に至り、今後の環境対策に活用できると思われる。ただし、一部軸動力の低下が見られたので、検討が必要だろう。

(2)O₃を発生する-8.0[kV]コロナ放電では、NO_xの増加PMの微細化する傾向がみられた。O₃を発生させずに吸気に高電圧をかけることが重要であるようだ。

(3)CH₄ガス混入に関しては、CH₄の燃料的側面から軸動力の向上に至ったとみられるほか、シリンダ内の酸素をCH₄の燃焼により消費するため、主燃料の燃焼温度を抑えNO_xの生成を抑えたのではないかと考えられる。

9 今後の展望

今後の環境対策として、CH₄を含むバイオマスガスは支援燃焼ガスとして活用が期待できる。一方で、O₃を発生しないコロナ放電は、NO_x低減効果を持ち、PM粒径のコントロールできる可能性が本実験で明らかになった。また、コロナ放電に必要な電力も数W程度(数[kV] × 数[mA])と、機関定格出力と比較しても非常に小さくて済むことから、今後の発展が期待される。温度条件、印加電圧の方向など、さらに研究を深めていく。

参考文献

- 1) 廣澤ほか「船用ディーゼル機関での各種支援燃焼効果」,第83回(平成25年)マリンエンジニアリング学術講演会 講演論文集,pp115-116(2013/8)
- 2) 天野航介 吉本隆光「船用ディーゼルでの吸気条件における燃焼・排ガ斯特性」,神戸市立高専紀要集 第51号,pp19-24 (2013/3)
- 3) 赤松ほか「バイオマスガスの大気圧支援燃焼」,プラズマ応用化学,Vol.21,No.1,pp41-46(2013/1)