

各種支援燃焼によるディーゼルエンジンでの 燃焼及び排ガス特性

渡邊紳之介* 吉本隆光**

Characteristics of exhaust gas and combustion in a diesel engine by various species of assisted combustion

Shinnosuke WATANABE* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The diesel engine has the high thermal efficiency and can be powered by the various species of fuels. However, the contents of exhaust gas from a diesel engine such as NO_x and other substances cause to the air pollution. The non-thermal equilibrium plasma is applied to a pre-processing. The objective is to study the effect of the reduction of NO_x and improve the state of the engine by performing the corona discharge where intake air flows, thereby generating a negative corona and positive corona. The results are obtained as follows. (1) Reduction of NO_x is found in the case of performing a corona discharge of more than 4.0 kV to the normal air conditions. In addition, if it is mixed with CH_4 , reduction in NO_x concentration is observed regardless to the voltage to be discharged. (2) Amount of the dust is increased by adding of CH_4 . There is no reduction in amount of the dust if it is mixed in the intake air with a corona discharge.

Keywords : Combustion, Exhaust gas, NO_x , Corona discharge

1. はじめに

高まる環境問題への取り組みの中、各種内燃機関の排出ガスによる大気汚染は地球規模の問題で、陸上だけでなく海洋においても大きな問題となっている。特に、海洋では陸上に比べて低質な硫黄分の多い燃料が多く使用されており、硫酸化物や煤塵の排出が問題視されている。一方で、石油自体の枯渇問題が深刻となっており、再生可能エネルギーとして新しい燃料の有効利用が重要視されている。

各種燃料に対応が可能で、熱効率が低いディーゼルエンジンは自動車や船舶など幅広い分野で使用されている。しかし、ディーゼルエンジンから排出される NO_x , SO_x , PM 等は大気汚染⁽¹⁾の原因となっている。 NO_x , PM の抑制法としては EGR や尿素 SCR 等が有用されている。新たな後処理抑制法の一つとして非熱平衡プラズマを用いた研究⁽²⁾が行われている。

本研究では、非熱平衡プラズマを前処理としてディーゼルエンジンに応用した。そこで吸気する空気にコロナ放電を行い、正針コロナならびに負針コロナを発生させ、一部プラズマ状態の空気を吸気することでエンジン内の圧力ならびに排ガス濃度 (NO_x 濃度, CO_2 割合, O_2 割合), 煤塵量の測定を行い、燃焼特性、排ガス特性への影響を調べる⁽³⁾⁽⁴⁾。また、 CH_4 混入によるデュアルフェューエル燃焼で再生可能エネルギーの有効利用として適用し、同様の測定を行う⁽⁵⁾。

2. 実験装置と方法

2.1 使用機関 使用機関として予燃焼式ディーゼル機関(ヤンマーディーゼル製 1600cc4 ストローク2 気筒エンジン 13.2[kW]/1800[rpm])を使用する。この機関には直流電気動力計(容量 11[kW], 回転数 550~1650[rpm], 電圧 220[V], 電流 37[A])がたわみ軸継ぎ手を介して接続されている。Table1 に使用機関の仕様を示す。

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 特任教授

Table1 Specification of diesel engine

Type	Yammer 2TL
Bore × Stroke	95×115 [mm]
Cylinder	2
Compression ratio	18.6
Max power	13.2/1800[kW/rpm]
The length of connecting rod	230[mm]
The length of crank arm	57.5[mm]
Fuel jet timing	10~12° before TDC
Fuel jet pressure	16[MPa]
Valve lift in no compression	1.1[mm]

Fig.1 に実験装置の簡略を示す。

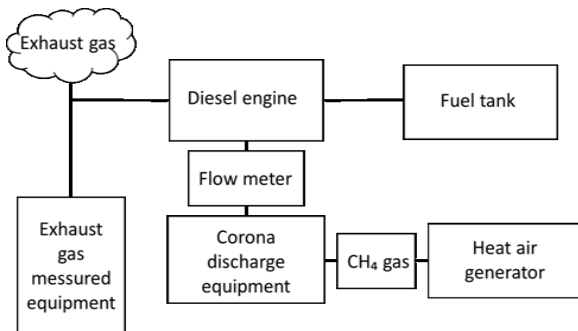


Fig.1 Flow diagram (corona discharge)

燃焼用空気を送気するために電動送風機が熱風発生機を介してディーゼルエンジンの吸気ラインに接続されている。Table2, Table3 に熱風発生器と電動送風機の仕様を示す。

Table2 Specification of hot air generator

Temperature range	Natural Temperature+15~300 [°C]
Air volume control range	1.7~3.5[m ³ /min]
Total capacity	6.9[kW]

Table3 Specification of blower

Maximum air flow	6.0 [m ³ /min]
Maximum static pressure	430 [kPa]
Revolution	3450 [rpm]

排ガス中の成分を測定するために燃焼排ガス分析計 (tosto340:テストー製)を使用する。煤塵量を測定するためにパーティクルカウンター(KC-01C:LION 製), 試料空気

希釈装置(KD-02B:LION 製)を使用する。燃焼室の圧力を測定するためにエンジン指圧変換器(PE-200KP, 定格容量 20[MPa]:共和電業製)ひずみゲージ式変換器(PCD-300B:共和電業製), データ収録ソフトウェア(PCD-100A:共和電業製)を使用する。

2.2 実験方法及び実験条件 吸気条件は主に、コンプレッサーまたは熱風発生器による強制吸気状態であり、混合ガスは強制送気の燃焼空気中に混入させる。燃料はA重油を使用した。吸気する空气にコロナ放電を行い、空気を活性化させ、そのときの筒内圧力ならびに排ガス濃度を測定する。コロナ放電は負電圧放電による負針コロナの2種類を発生させ、実験を行った。Fig.2にコロナ放電発生装置の概要を示す。ノコギリ状の電極と平板の電極の間で放電されノコギリ状の電極を、陽極にした場合、正針コロナという。平板側を陽極にした場合を負針コロナという。

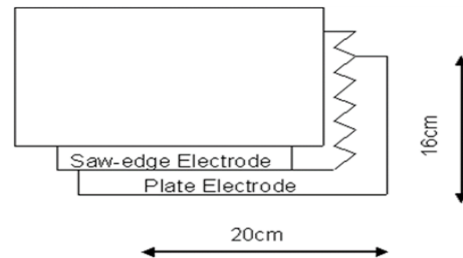


Fig.2 Corona discharge equipment

本実験におけるディーゼル機関の吸気条件をTable4に示す。

Table4 Intake condition

Fuel	A Heavy oil
Revolution	1000[rpm]
Quantity of forced supply air	500[L/min]
Air temperature	35[°C], 90[°C]
Coolant temperature	40[°C]
Applied voltage	±4.0[kV], ±8.0[kV]
Quantity of CH ₄ mixed into air	10[L/min]
Measured components about characteristic of combustion	Pressure in the cylinder
Measured components of exhaust gas	NO _x , CO ₂ , and O ₂

3. 実験結果

3.1 筒内圧力 Fig.3 から Fig.6 に各条件下の筒内圧力を示す。Fig.3 と Fig.4 はそれぞれ吸気温度が 35°C, 90°C

の時の自然吸気，強制吸気，CH₄ 混入の 3 つの条件を比較した圧力線図である。

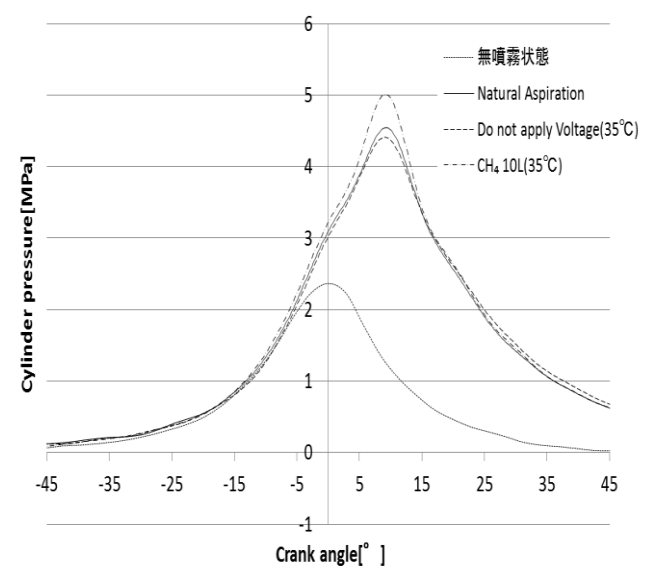


Fig.3 Cylinder pressure (35°C)

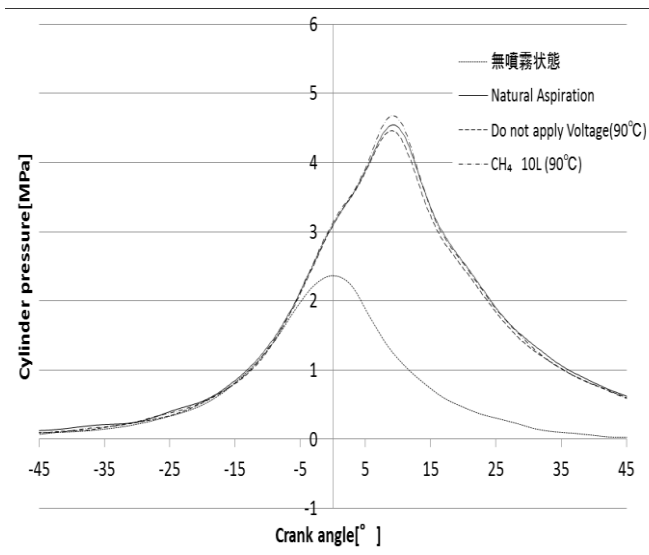


Fig.4 Cylinder pressure (90°C)

Fig.3 では，CH₄ を混入した場合が最も高い圧力を示した。Fig.4 でも同様に CH₄ の圧力値が最も高い値を示しているが，自然吸気および強制吸気との差は小さくなっている。これより，CH₄ 混入によるデュアルフェーゼル燃焼により CH₄ も燃焼して機関内の圧力は上昇するが，吸気温度を上げることによって，CH₄ 混入による圧力上昇は小さい。空気温度が上がることによる空気充填率が下がったためと考えられる。

Fig.5 と Fig.6 はそれぞれ吸気温度が 35°C，90°C の時の強制吸気，CH₄ 混入，コロナ放電，コロナ放電+CH₄ 混入の条件を比較した圧力線図である。

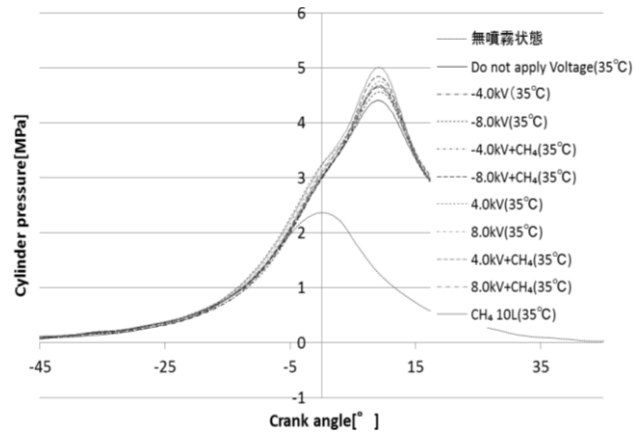


Fig.5 Cylinder pressure (35°C)

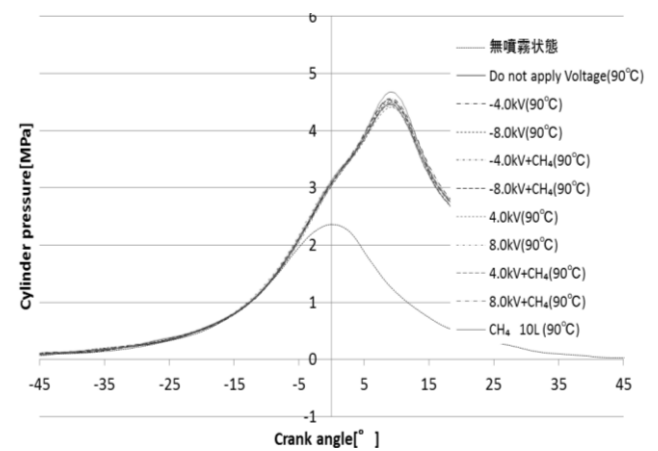


Fig.6 Cylinder pressure (90°C)

Fig.5 と Fig.6 より，吸気にコロナ放電を行うことで筒内圧力は上昇する。また，吸気に CH₄ を混入することで筒内圧力は更に上昇した。正針コロナ放電では電圧の絶対値が低く，負針コロナ放電では電圧の絶対値が高い方が，筒内圧力が上昇する傾向が見られた。しかし，こちらも吸気温度を上昇することで圧力上昇の効果は小さくなった。

3.2 排ガス測定

3.2.1 NO_x 濃度 Fig.7, Fig.8 に吸気温度が 35°C，90°C の時の常温空気のみ，CH₄ 混合の場合の NO_x 濃度を示す。

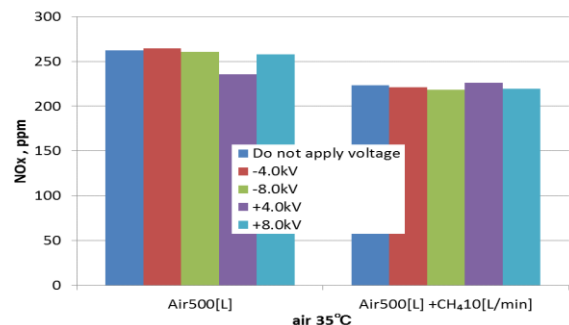


Fig.7 NO_x concentration (35°C)

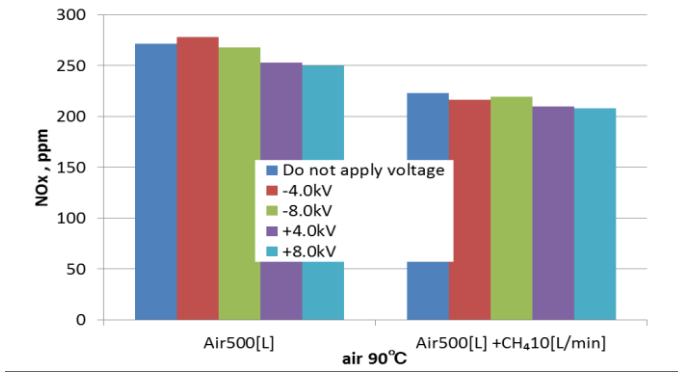


Fig.8 NO_x concentration (90°C)

Fig.7より+4.0kVのコロナ放電を行った場合、強制吸気のみではNO_x濃度の低下が見られた。また、吸気空気にCH₄を混入させた場合、強制吸気のみの場合と比較してNO_x濃度の低下が見られた。Fig.8より+4.0kV、+8.0kVの放電条件において強制吸気、強制吸気+CH₄混入の両条件においてNO_x濃度の低減が見られ、-4.0kVの放電条件でNO_x濃度の上昇が見られた。また、こちらの吸気温度条件においても吸気中にCH₄を混入することでNO_x濃度の低減が見られた。

3.2.2 CO₂割合 Fig.9, Fig.10に吸気温度が35°C, 90°Cの時の常温空気のみ、CH₄混合の場合のCO₂割合を示す。

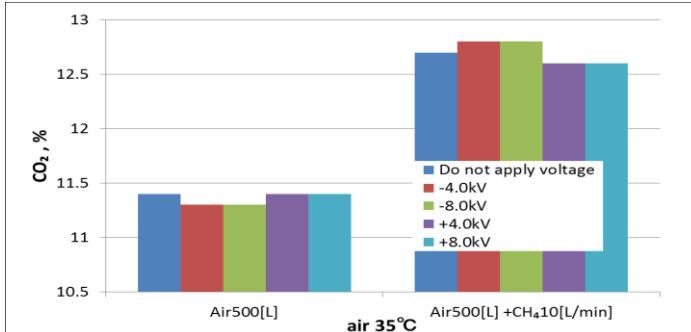


Fig.9 CO₂ percentage (35°C)

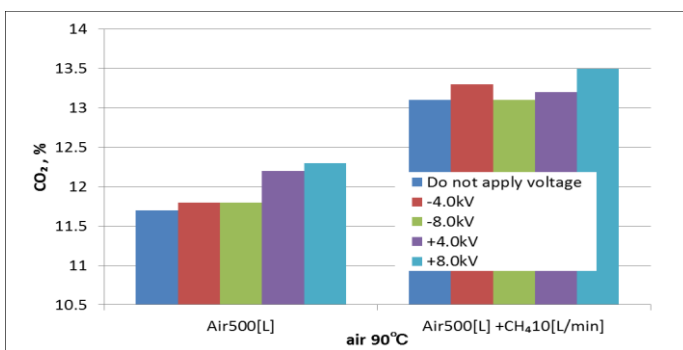


Fig.10 CO₂ percentage (90°C)

吸気温度が35°C, 90°Cのどちらの条件においてもコロナ放電によるCO₂割合への影響は見られなかった。

また、CH₄を混入させることで、排ガス中のCO₂の割合は上昇した。これは混入させたCH₄のCが燃焼によって空気中のO₂と結びついた為であると考えられる。

3.2.3 O₂割合 Fig.11, Fig.12に吸気温度が35°C, 90°Cの時の常温空気のみ、CH₄混合の場合のO₂割合を示す。

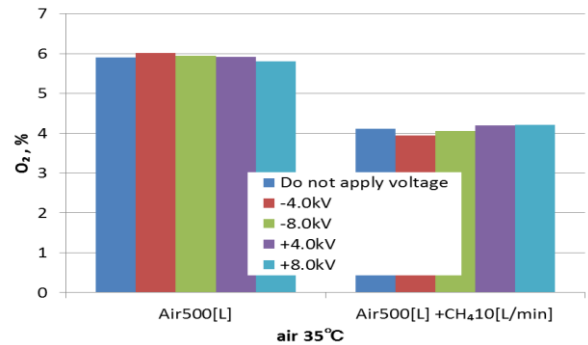


Fig.11 O₂ percentage (35°C)

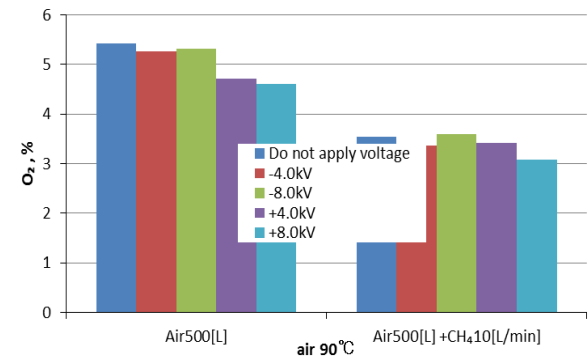


Fig.12 O₂ percentage (90°C)

Fig.11, Fig.12より、O₂割合はCH₄を混入することで低下し、CO₂割合とは逆の傾向が見られた。O₂割合もCO₂割合と同様にコロナ放電の影響は見られなかった。CO₂割合とO₂割合の結果から、CH₄には吸気中に混入することで燃焼性を向上する働きがあると考察される。

3.3 煤塵測定

3.3.1 煤塵量測定 Fig.13, Fig.14に各実験条件での煤塵量を示す。

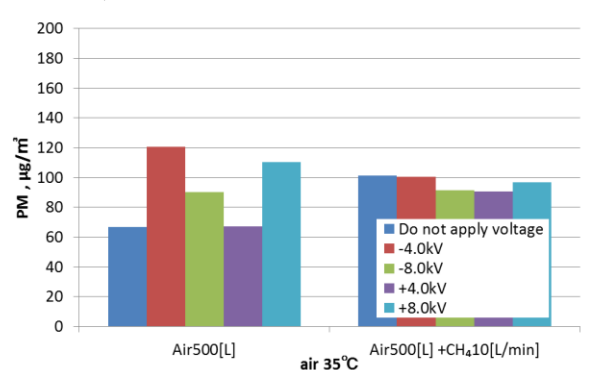


Fig.13 Amount of soot and dust

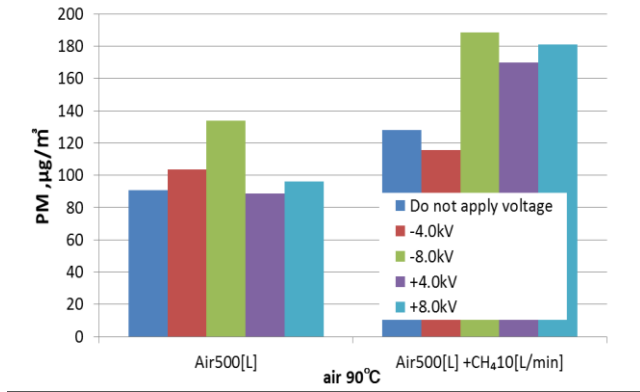


Fig. 14 Amount of soot and dust

Fig. 13 および Fig. 14 より、吸気空気にコロナ放電を行うことで煤塵量が増加する傾向が見られた。また、CH₄ を混入することで強制吸気のみと比較して煤塵量は上昇する傾向が見られた。このことから、デュアルフール燃焼によりガス燃料 (CH₄) が先に着火・燃焼し、液体燃料 (A 重油) の着火が遅れ煤塵量の増加すると考えられる。

3.3.2 煤塵数測定 Fig. 15 から Fig. 18 に各実験条件での煤塵数を粒径毎に対数グラフで示す。

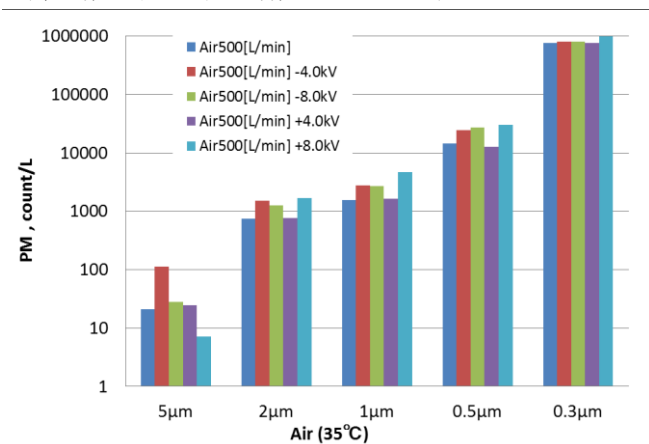


Fig. 15 Soot and dust count (35°C)

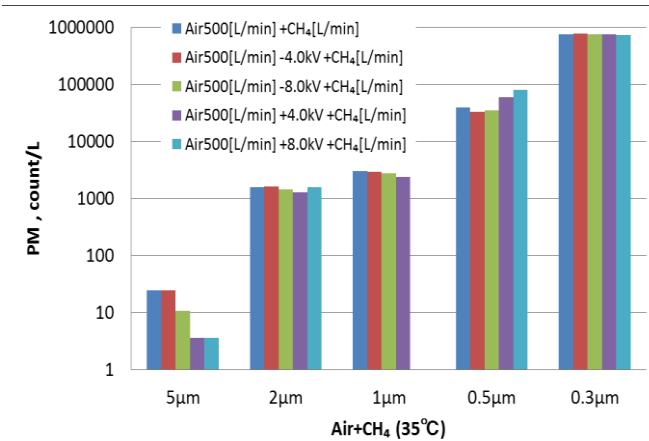


Fig. 16 Soot and dust count (+CH₄, 35°C)

Fig. 15 と Fig. 16 を比較すると、吸気中に CH₄ を混入することで粒径が 0.5µm の煤塵数が増加した。また、粒径が 5µm の煤塵は CH₄ を混入することで減少した。

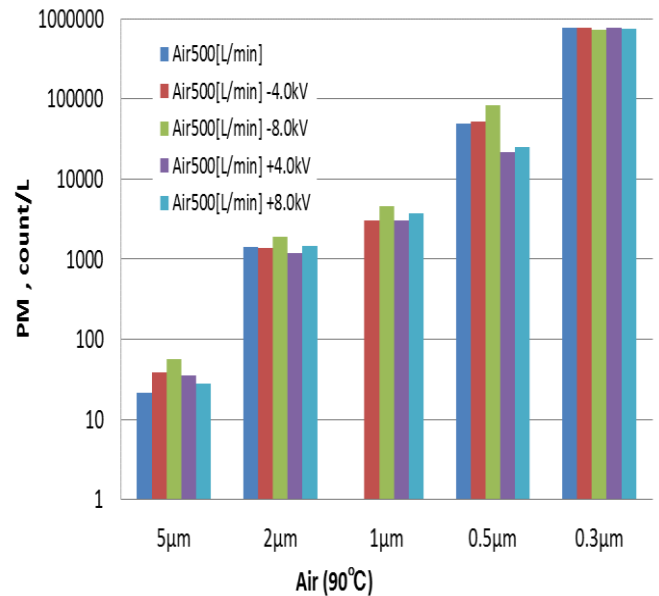


Fig. 17 Soot and dust count (90°C)

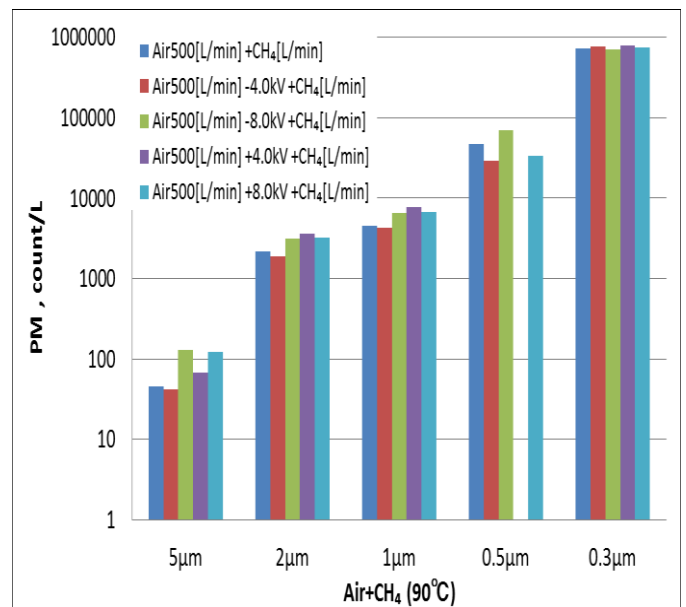


Fig. 18 Soot and dust count (+CH₄, 90°C)

Fig. 17 と Fig. 18 を比較すると、吸気中に CH₄ を混入することで、粒径が 5µm, 2µm, 1µm の煤塵数が増加した。また、吸気温度を上昇させることで、0.3µm を除く粒径において煤塵数が上昇する傾向が見られた。

3.4 軸出力 Fig. 19 と Fig. 20 に各実験条件での軸出力を示す。

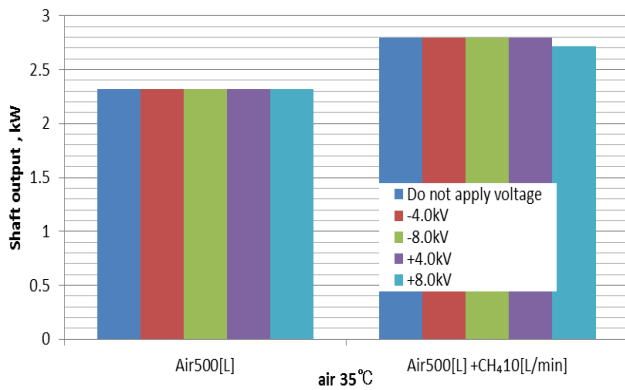


Fig.19 Shaft output (35°C)

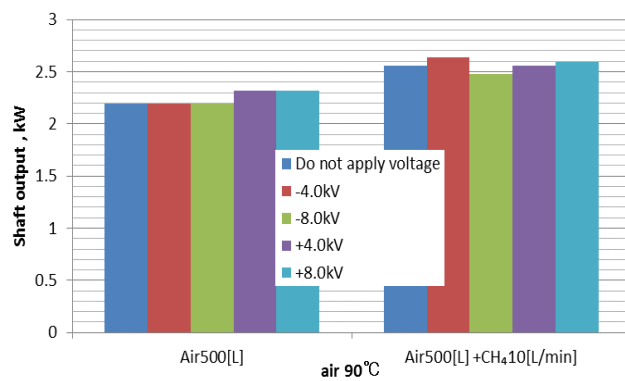


Fig.20 Shaft output (90°C)

どちらの吸気温度条件においても CH₄ を混入させることで軸出力は上昇した。しかし、吸気温度が 90°C の場合では軸出力の上昇幅は少ない傾向が見られた。また、コロナ放電を行ったことによる軸出力の変化は見られなかった。

4. まとめ

吸気中にコロナ放電及び CH₄ 混入を行った場合のまとめを以下に示す。

- (1)自然吸気，強制吸気，CH₄ 混入の条件で筒内圧力を比較した場合，CH₄ 混入時の筒内圧力が最も高い。しかし，吸気温度を上昇させることで CH₄ 混入によるデュアルフューエル燃焼により，圧力上昇の幅は減少する。
- (2)通常送気状態にコロナ放電を行うと筒内圧力は上昇する。また，CH₄ を混入することで筒内圧力は更に上昇する。
- (3)吸気温度 35°C の強制吸気状態にコロナ放電を行うと+4.0kV の場合において NO_x の低下が見られた。また，CH₄ を混入した場合，放電する電圧の大きさに関わらず NO_x 濃度の低下が見られた。
- (4)吸気温度 90°C の条件では，+4.0kV，+8.0kV の放電条件において強制吸気，強制吸気+CH₄ 混入の両条件において NO_x 濃度の低減が見られた。また，こちらの吸

気温度条件においても吸気中に CH₄ を混入することで NO_x 濃度の低減が見られた。

(5)吸気中に CH₄ を混入することで CO₂ 割合は上昇し O₂ 割合は低下した。CO₂ 割合と O₂ 割合はコロナ放電の影響を受けないと考えられる。

(6) 吸気空気にコロナ放電を行うことで煤塵量が増加する傾向が見られた。35°C の吸気温度条件では CH₄ 混入による煤塵量の変化は見られなかった。しかし，90°C の吸気異温度条件では CH₄ を混入した場合に煤塵量は上昇した。

(7)35°C の吸気温度条件では CH₄ を混入することで粒径が 0.5µm の煤塵数が上昇した。また，粒径が 5µm の煤塵数は減少した。90°C の吸気温度条件では CH₄ を混入することで，粒径が 5µm，2µm，1µm の煤塵数が増加した。吸気温度を上昇させることで，0.3µm を除く粒径において煤塵数が上昇する傾向が見られた。

(8) CH₄ を混入させることで軸出力は上昇した。しかし，吸気温度が 90°C の場合では軸出力の上昇幅は少ない傾向が見られた。また，コロナ放電を行ったことによる軸出力の変化は見られなかった。

以上のことからデュアルフューエル燃焼による筒内燃焼コントロールで NO_x 低減効果が明らかになった。また吸気でのコロナ放電によるプラズマ支援により燃焼改善がみられる知見が得られた。

参考文献

- (1) Kohsuke Amano, Yoshihiko Nawaki, Takamitsu Yoshi Kohsuke Amano, Yoshihiko Nawaki, Takamitsu Yoshimoto, Hirotsugu Fujita “CHARACTERISTICS OF COMBUSTION AND EXHAUST GAS IN MARINE DIESEL ENGINE BY MIXING VARIOUS SPECIES OF GAS” Proceedings of the3rd International Forum on Heat Transfer November 13-15, 2012, Nagasaki, Japan.
- (2) 小原考介, 藤井富朗, “コロナ放電リアクタによる燃焼排ガス中のダクト及び NO_x 処理”, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要, No.45(2007), pp.37-42.
- (3) 渡邊紳之介, 廣澤謙弥, 辻翔太, 吉本隆光, 赤松浩, 藤井富朗, 藤田浩嗣, “プラズマ支援燃焼によるディーゼルエンジンでの燃焼特性”, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文, pp.162-163, (2013.12.4)
- (4) 渡邊紳之介, 廣澤謙弥, 辻翔太, 吉本隆光, 藤井富朗, 赤松浩, “プラズマ支援燃焼によるディーゼルエンジンでの燃焼及び排ガ斯特性”, 日本機械学会関西支部第 88 期定時総会講演会講演論文集, 144-1, pp1-21, (2014.3)
- (5) 渡邊紳之介, 吉本隆光, 天野航介, 那脇慶彦, 藤井富朗, “ディーゼルエンジンでの吸気条件による燃焼・排ガ斯特性”, 日本機械学会動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 336-337, (2013.6.21)