

船用ディーゼルエンジンでの吸気条件による燃焼・排ガス特性

天野航介* 吉本隆光**

Characteristics of Combustion and Exhaust Gas on Intake Condition in a Marine Diesel Engine on Intake Air Conditions

Kosuke AMANO* 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 diesel engine such as NO_x , SO_x , CO_2 and other substances cause to the air pollution. Also, sulfur-rich fuels such as C-heavy fuel are used mainly on a marine diesel engine. The objective of this study is to investigate experimentally the influence on combustion in a diesel engine by mixing N_2 , CO_2 , CH_4 , N_2+CH_4 , CO_2+CH_4 to utilize renewable bio-mass fuels and by changing temperature of combustion air which come close to EGR system. And the corona discharge to intake air inperformed with positive corona or negative corona is produced and the intake air is activated as a part of intake air is ionized. (1)When mixing CH_4 with N_2 or CO_2 with intake air, concentrations of NO_x and SO_2 are decreased. And CO_2 concentration is higher because combustion is improved by mixing CH_4 . (2)When engine load is higher and negative discharge to intake air is performed, it is the most effective method such as NO_x concentration and SO_2 concentration are reduced.

KeyWords: NO_x , SO_x , EGR, Corona discharge

1.はじめに

環境問題への取り組みが高まる中、各種内燃機関の排出ガスによる大気汚染は地球規模の課題であり、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。さらに、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。

ところで、ディーゼルエンジンは熱効率が高く、低回転から安定したトルクが得ることから船舶や大型自動車等様々な分野で使用されている。しかし、ディーゼルエンジンの排ガス中には窒素酸化物、硫黄酸化物、二酸化炭素など環境に有害な成分が含まれており、大気汚染の主な原因になっている。特に、海洋では陸上に比べ、比較的low qualityな硫黄含有量が高い燃料が多く使用されているため、窒素酸化物だけではなく、硫黄酸化物の排出も問題視されており、排ガス対策が求められている。

そこで本研究では船用ディーゼルエンジンを用いて、海洋で多く使用されている低質燃料を使用し、吸気条件を変えた場合にて、エンジンの性能や排ガス成分にどのような変化が見られるかを検討した⁽¹⁾。

強制的に空気を供給する強制送気状態をもとに、再生可能エネルギーである低カロリーバイオ燃料を想定したメタンの有効利用として、メタンを吸気ラインに混合した。また、EGR（排気再循環）による低 NO_x 燃焼を想定した窒素や二酸化炭素を混ぜた状態において、吸気量の変化によるエンジン性能（燃料消費量、燃焼室内の圧力）ならびに排ガス濃度（ NO_x 濃度、 SO_2 濃度、 CO_2 濃度、 O_2 濃度）の測定を行い、燃焼特性や排ガス特性への影響について調べた⁽²⁾⁽³⁾。

また NO_x 、PMの新たな抑制法の一つとして非熱平衡プラズマを用いた研究⁽⁴⁾が行われている。そこで本研究では吸気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、吸気空気の一部イオン化を行い吸気空気の活性化による排ガス特性への影響について調べる。

2.実験装置と方法

2.1 使用機関 予燃焼室式ディーゼル機関（ヤンマーディーゼル製 1600cc 4ストローク 2気筒エンジン 13.2[kW]/1800[rpm]）を使用する。表1にエンジンの主要諸元を示す。

この機関は直流電気動力計（容量11[kW]、回転数550～1650[rpm]、電圧220[V]、電流37[A]）とたわみ軸継ぎ手を介して接続されている。

* 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

Table 1 Specification of diesel engine

Form	Yanmer2TL
Bore×stroke[mm]	95×115
Cylinder	2
Compression ratio	18.6
Max power[kW/rpm]	13.2/1800
The length of connecting rod[mm]	230
The length of crank arm[mm]	57.5
Fuel jet timing	10~12°before TDC
Fuel jet pressure[MPa]	16
Valve lift in no compression[mm]	1.1

燃焼用空気を送気するために高風圧熱風発生機（HAP3050，吐出気体温度範囲常温+15~300[°C]，風量調整範囲 1.7~3.5[m³/min]，総容量 6.9[kW]：八光電機製作所製）が電動送風機（U75-3-R313，最大風量 6.0[m³/min]，最大静圧 4.30[kPa]，回転数 3450[rpm]：昭和電機製）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。

排ガス中の成分（NO_x，SO₂，CO₂，O₂）を測定するために燃焼排ガス分析計（testo340：テストー製）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 強制送気状態をもとにして，混合ガスとして N₂，CO₂，CH₄，N₂+CH₄，CO₂+CH₄ を燃焼用空気に混入した。燃焼用空気の流量は 500[l/min]，吸気温度は常温と 70[°C]の条件で実験を行い，高風圧熱風発生機で温度を調整した。高風圧熱風発生機からの空気に流量計を介して流量調整を行った。各種ガスを混合した後，エンジンに吸気し燃焼を行った。排ガス中の各種成分の濃度は，エンジンの燃焼室出口にて燃焼排ガス分析計を用いて計測した。

燃料は海洋で主に使用されている C 重油を想定し，A 重油に硫黄分を添加したものを使用した。表 2 に A 重油の物性値を示す。

Table 2 Fuel properties

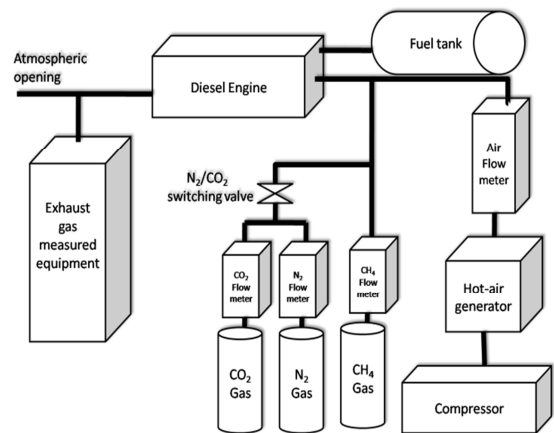
Fuel	A heavy oil
Sulfur content [%]	Less than 0.09
Carbon content [%]	Less than 86.0
Nitrogen content [%]	Less than 0.020
Specific gravity 15/4°C	0.85
Lower calorific value [kJ/kg] (kcal/kg)	42700 (10200)

また，コロナ放電は正電圧放電による正針コロナ，ならびに負電圧放電による負針コロナの 2 種類を発生させ，負荷率 25%，50%の条件で実験を行った。図 1 にそれぞれの装置の概要を示す。

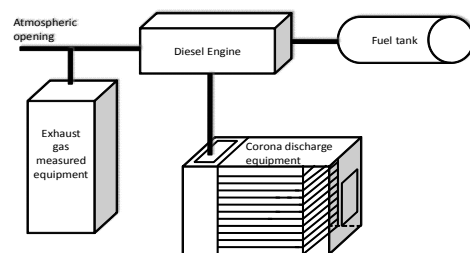
ディーゼルエンジンの実験条件を表 3 に示す。

Table 3 Intake Condition

Fuel	A heavy oil + S 1.5%
Revolution	1000[rpm]
Quantity of forced supply air	500[L/min]
Air temperature	20 and 70[°C]
Species of gas added into the combustion air	N ₂ ，CO ₂ N ₂ or CO ₂ + CH ₄
Flow rate of inert gas (N ₂ or CO ₂) mixed into air	From 5 to 50 [L/min]
Quantity of methane mixed into air	From 5 to 15 [L/min]
Measured components of exhaust gas	NO _x ，SO ₂ ，CO ₂ and O ₂



(a) Simulated EGR



(b) Corona discharged
Fig.1 Flow diagram

3. 実験結果

3.1 熱効率 図2に吸気温度が常温, 図3に吸気温度70°Cにおけるガス混合割合に対する熱効率を示す。

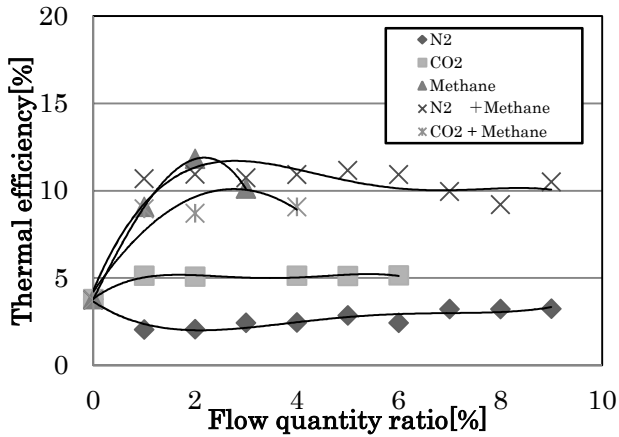


Fig.2 Thermal efficiency

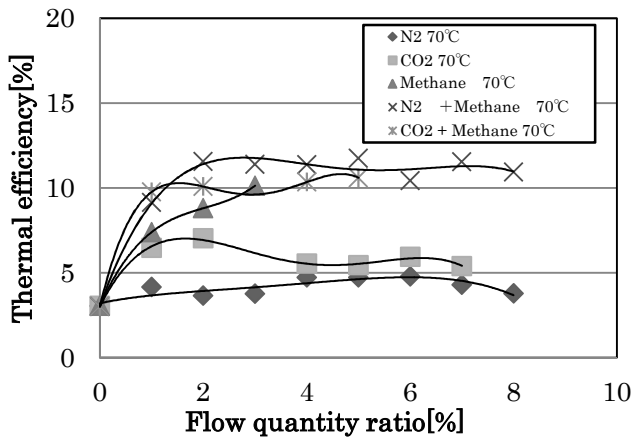


Fig.3 Thermal efficiency 70°C

吸気温度が常温及び70°Cの両条件について、N₂およびCO₂にCH₄を混合すると正味熱効率が高くなった。CH₄を混合することにより、燃焼性が良くなり正味熱効率が高くなったためであると考えられる。

3.2 NO_x 濃度 図4に吸気温度が常温, 図5に吸気温度70°Cにおけるガス混合割合に対するNO_x濃度⁽⁵⁾⁽⁶⁾を示す。

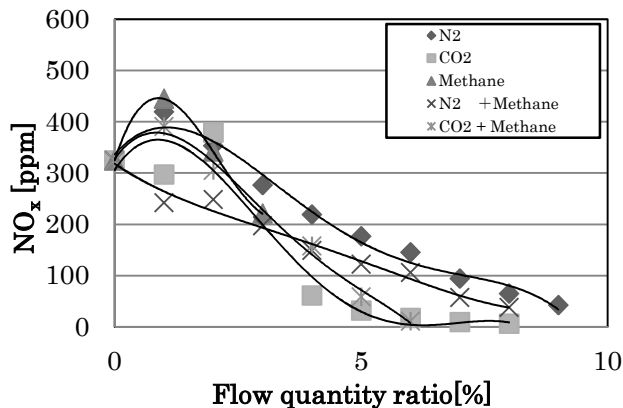


Fig.4 NO_x concentration

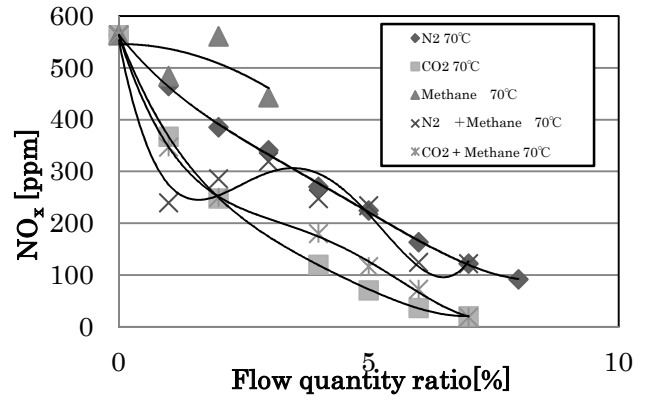


Fig.5 NO_x concentration 70°C

図4より不活性ガスであるN₂, CO₂を混合することでEGR効果によりNO_x濃度が低くなった。またN₂にCH₄を混合することで更にNO_x濃度が低減した。図5より不活性ガスであるN₂, CO₂を混合することでEGR効果によりNO_x濃度が低くなった。N₂またはCO₂にCH₄を混合することでNO_x濃度が低減した。また吸気温度を高くすることで燃焼温度が高くなりNO_x濃度は高くなった。

3.3 SO₂ 濃度 図6に吸気温度が常温, 図7に吸気温度70°Cにおけるガス混合割合に対するSO₂濃度⁽⁵⁾⁽⁶⁾を示す。

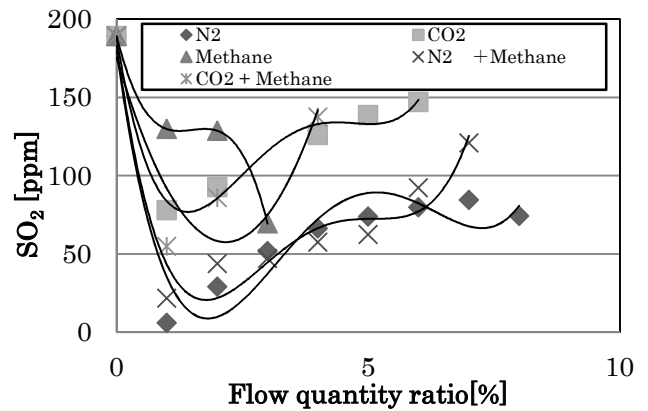


Fig.6 SO₂ concentration

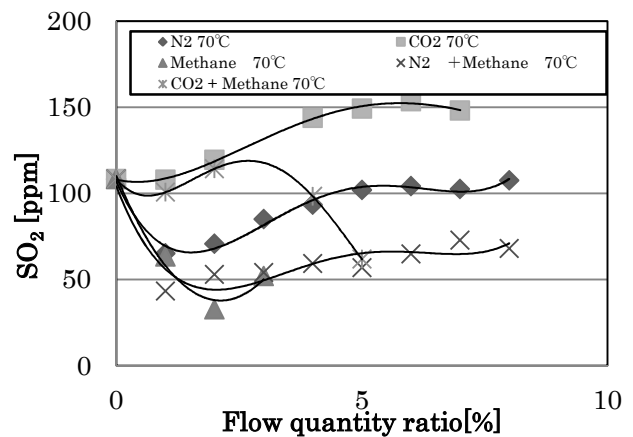


Fig.7 SO₂ concentration 70°C

図 6 より, N₂ 混合, CO₂ 混合の両条件で, SO₂ 低減効果があった. N₂ 及び CO₂ に CH₄ を混合すると, CH₄ 混合による SO₂ 濃度への大きな影響は得られなかった.

吸気温度 70°C について, 図 7 より N₂ 混合, N₂+CH₄ 混合の場合は強制送気状態に比べ SO₂ 濃度は低くなった. CO₂ 混合の場合は SO₂ 濃度が高くなったが, CO₂ に CH₄ を混合することで SO₂ 濃度低減効果が得られた.

3.4 CO₂ 濃度 図 8 に吸気温度が常温, 図 9 に吸気温度 70°C におけるガス混合割合に対する CO₂ 濃度を示す.

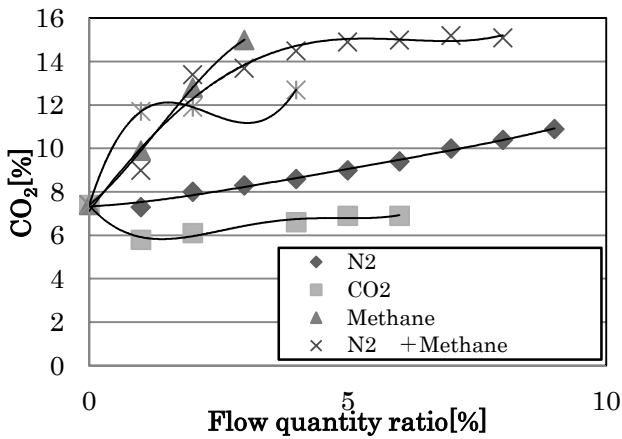


Fig.8 CO₂ concentration

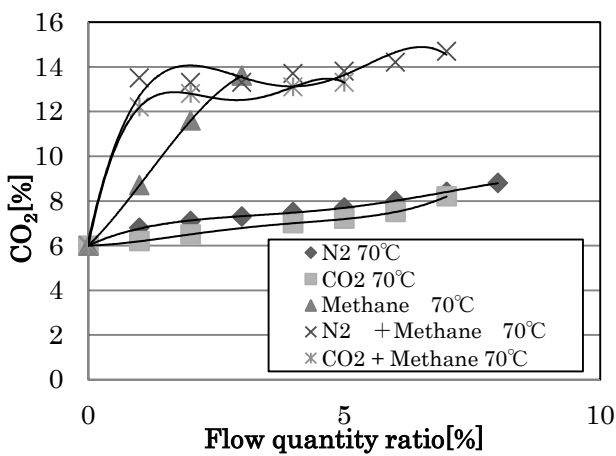


Fig.9 CO₂ concentration 70°C

図 8 より, N₂, CO₂ に CH₄ を混合することで燃焼性が良くなり CO₂ 濃度が高くなった. 図 9 より, 吸気温度が 70°C の場合でも N₂, CO₂ に CH₄ を混合することで燃焼性が良くなり CO₂ 濃度が高くなった.

3.5 P-θ 線図 図 10 から図 13 に吸気温度が常温での N₂ 混合, N₂+CH₄ 混合, CO₂ 混合, N₂+CH₄ 混合の条件での P-θ 線図を示す.

図 10 より N₂ の混合量を増加させていくと着火遅れが長くなり, N₂ 45[l/min] 混合の条件で燃焼が行われなくなった. 図 11 より N₂ に CH₄ を混合することで更に着火遅れが長くなった. 図 10 に示す N₂ 混合と図 11 に示す N₂+CH₄ 混合を比較することで, CH₄ の混合により着火性が悪くなり, 着火遅れが長くなった. さらに, 燃焼が止まるタイミングが早くなるという結果が得ら

れた.

図 12 より CO₂ 混合の場合も同様に, CO₂ の混合量を増加させると着火遅れが長くなり, CO₂ 35[l/min] 混合の条件で燃焼が行われなくなった. 図 13 も同様に CO₂ に CH₄ を混合することで更に着火遅れが長くなった.

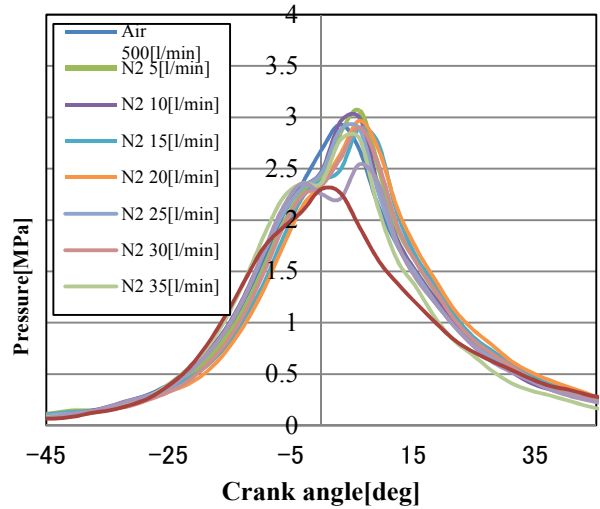


Fig.10 P-θ diagram N₂

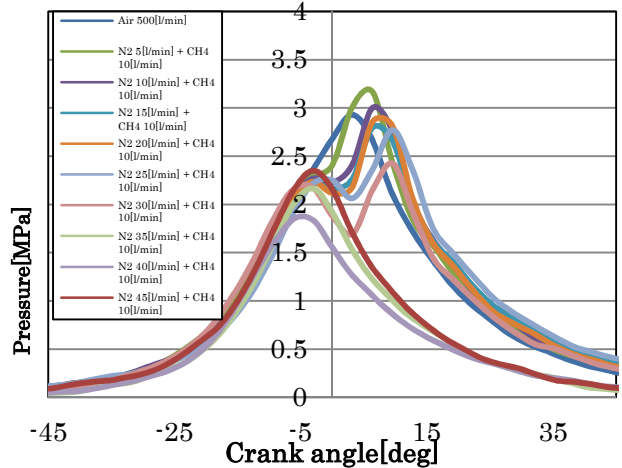


Fig.11 P-θ diagram N₂+CH₄

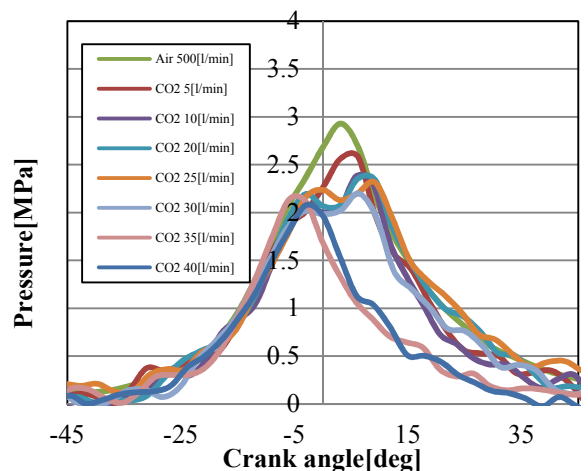


Fig.12 P-θ diagram CO₂

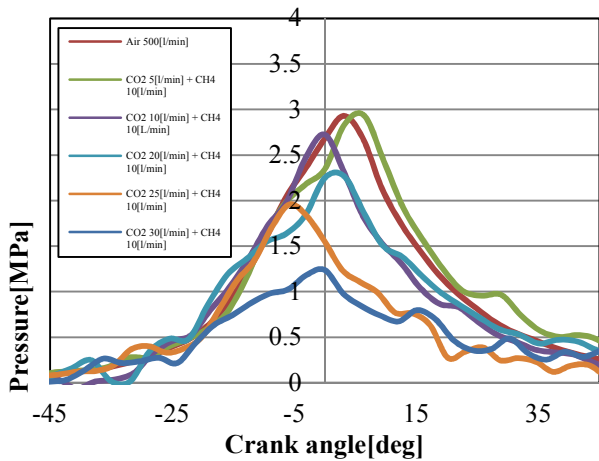


Fig.13 P-θ diagram CO₂+CH₄

3.6 吸気ガス活性化による排ガス特性 図 14 にエンジン負荷率 25%, 50% の条件での NA (自然吸気), 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の NO_x 濃度の比較を示す. 図 15 にエンジン負荷率 25%, 50% の条件での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の SO₂ 濃度の比較を示す. 図 16 にエンジン負荷率 25%, 50% の条件での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の CO₂ 濃度の比較を示す.

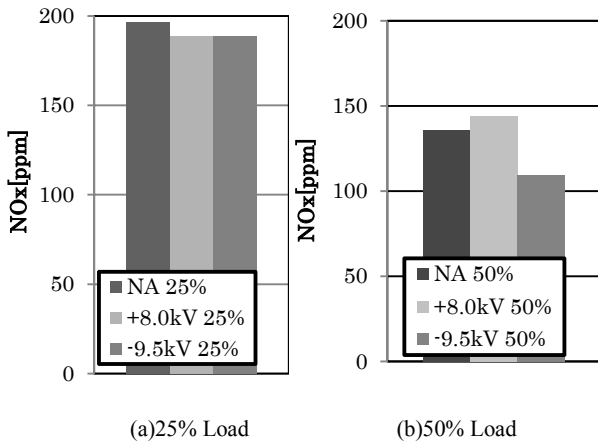


Fig.14 NO_x concentration with corona discharge

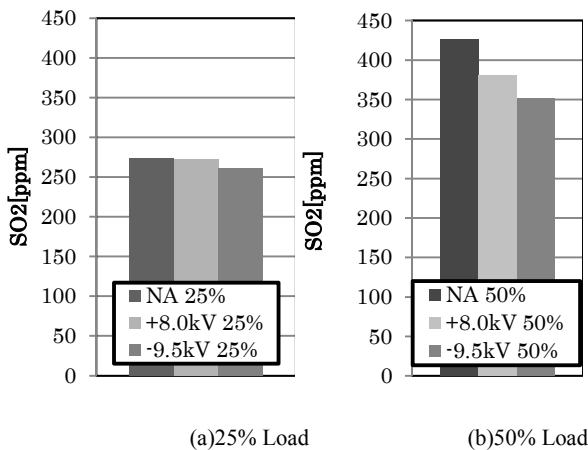


Fig.15 SO₂ concentration with corona discharge

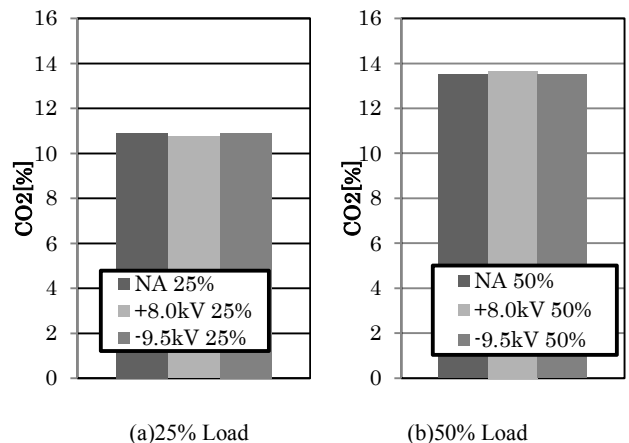


Fig.16 CO₂ concentration with corona discharge

図 14 よりエンジン負荷率 25% の場合では正針コロナ, 負針コロナとも約 4.0% の NO_x 濃度低減が見られる. 一方, エンジン負荷率 50% の場合は負針コロナ吸気のみ約 19.3% の NO_x 濃度低減が得られた.

図 15 よりエンジン負荷率 25% の場合では正針コロナでは約 0.6%, 負針コロナでは約 4.6% の SO₂ 濃度低減が見られる. 一方, エンジン負荷率 50% の場合は正針コロナでは約 10.7%, 負針コロナでは約 17.7% の SO₂ 濃度低減が得られた.

図 16 より負荷率 25%, 50% の両条件において, 変化は僅かであるが正針コロナでは CO₂ 濃度が低減し, 負針コロナでは CO₂ 濃度が高くなった. このことより, 負針コロナでは筒内での燃焼性が向上していると推測される⁽⁸⁾.

3.7 吸気ガス活性化による P-θ 線図・熱発生率 図 17 にエンジン負荷率 25% での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気における P-θ 線図, 熱発生率を示す. 図 18 にエンジン負荷率 50% での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気における P-θ 線図, 熱発生率を示す.

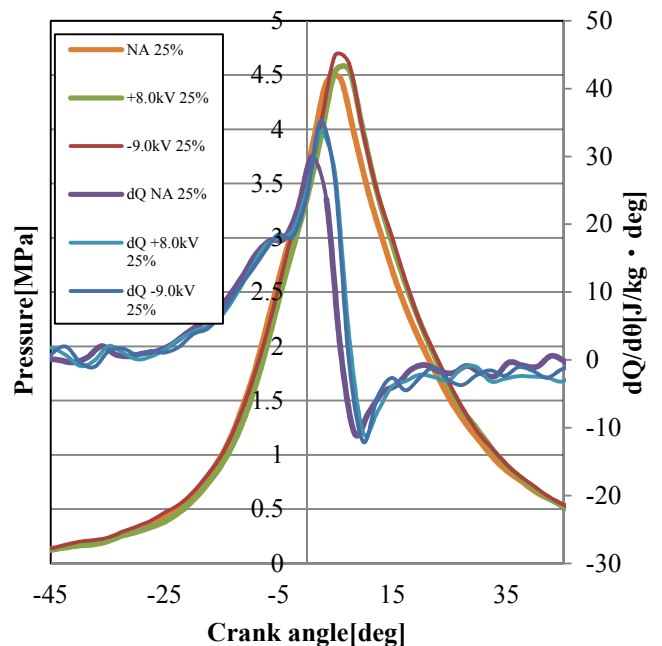


Fig.17 P-θ and dQ/dθ diagram 25%

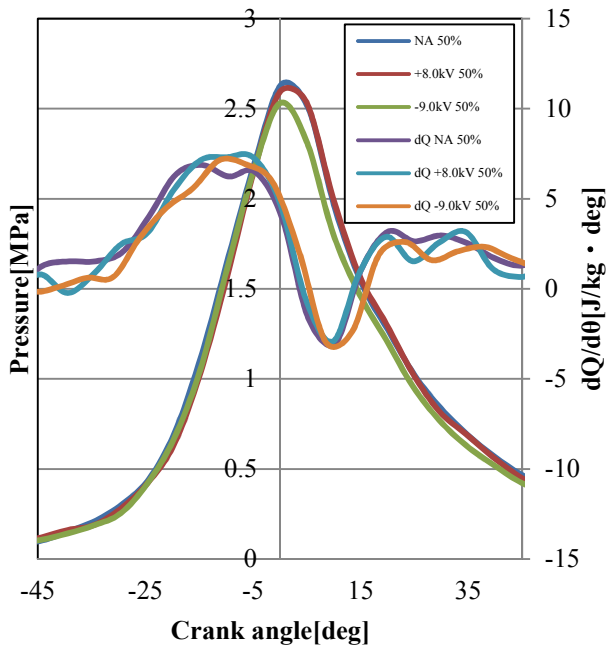


Fig.18 P-θ and dQ/dθ diagram 50%

図 17 よりエンジン負荷率 25%の場合, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の両条件で空気活性化により筒内最高圧力が高くなった. 更に, 熱発生率も高くなり, 燃焼終わりが遅れ, 燃焼時間が長くなった. その効果は負針コロナ吸気の方が大きい結果が得られた.

図 18 よりエンジン負荷率 50%の場合には正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の両条件で筒内最高圧力が低くなり, 燃焼終わりが早くなるという結果が得られた⁽⁹⁾.

4.まとめ

模擬 EGR, かつ低カロリーバイオマスガスの有効利用としてのメタン吸気, 正電圧放電による正針コロナ, 負電圧放電による負針コロナで活性化した空気の吸気を行った場合のまとめを以下に示す.

- (1) 模擬 EGR による N_2 , CO_2 混合によりは NO_x 低減が行え, SO_2 低減に効果があった. 吸気温度を高くした場合は SO_2 濃度に大きな効果が得られなかった.
- (2) 模擬 EGR とメタンの吸気を組み合わせることで NO_x , SO_2 の同時低減ができた. その反面, 燃焼性が改善され, 熱効率が向上して CO_2 濃度が高くなった.
- (3) エンジン負荷率 25%の場合には正針コロナ, 負針コロナの両条件で僅かであるが NO_x , SO_2 低減できた. そのときの筒内最高圧力は正針コロナ, 負針コロナの両条件で高くなり, 熱発生率も高くなり, 燃焼時間が長くなった. 負針コロナは正針コロナに比べその効果は大きいという知見が得られた.
- (4) エンジン負荷率 50%では負針コロナの条件で NO_x 濃度を約 19.3%低減, SO_2 濃度を約 17.7%低減した. そのときの正針コロナ, 負針コロナの両条件で筒内最高圧力が低くなり, 燃焼終わりが早くなるという結果が得られた.
- (5) エンジン負荷率が高い場合にコロナ放電による空

気活性化の効果は大きく, かつ負電圧放電による負針コロナの方がより効果が大きい結果になった.

参考文献

- (1) 天野航介, 中嶋聡, 吉本隆光, 藤田浩嗣:「船用ディーゼルにおける燃焼と $NO_x \cdot SO_2$ に関する実験的研究」, マリンエンジニアリング学術講演会, 第 81 回, pp.67-68, 2011.
- (2) 天野航介, 中嶋聡, 吉本隆光, 鮫島良二:「船用ディーゼルでの吸気条件による燃焼・排ガス特性に関する研究」, 第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.125-126, 2011.
- (3) Kosuke AMANO, Satoshi NAKAZIMA, Takamitsu YOSHIMOTO, Hirotsugu FUJITA:「Characteristics of Combustion and Exhaust Gas in Diesel Engine by Mixing Various Gasous Fuel」, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME), 9th, C3-2, 2011.
- (4) 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」, 神戸高専研究紀要, 第 45 号, pp.37-42, 2007.
- (5) 天野航介, 鋳尾真典, 竹垣颯, 吉本隆光, 藤田浩嗣:「船用ディーゼルでの吸気条件による燃焼・排ガス特性」, 関西支部第 87 期定時総会講演会論文集, pp.2-21, 2012.
- (6) 天野航介, 吉本隆光, 藤田浩嗣:「筒内燃焼における $NO_x \cdot SO_x$ 等排ガス特性」, 日本機械学会 2012 年度年次大会, G090011, 2012.
- (7) 天野航介, 那脇慶彦, 坂本健太郎, 吉本隆光, 藤井富朗, 藤田浩嗣:「船用ディーゼル機関の吸気活性化における燃焼及び排ガス特性への影響」, 第 82 回マリンエンジニアリング学術講演会, pp.111-112, 2012.
- (8) 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 the 3rd International Forum on Heat Transfer (IFHT), 138, 2012.
- (9) 天野航介, 高寺健太郎, 那脇慶彦, 吉本隆光, 赤松浩, 藤井富朗, 高城敏美:「大気圧プラズマ支援燃焼による排ガス特性への影響」, 第 50 回燃焼シンポジウム, 2012.