

小型ガスエンジの燃焼改善に関する研究：特に燃焼性状とメタン添加の影響について

落合, 浩史 / OCHIAI, Hiroshi

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

59

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014615>

小型ガスエンジンの燃焼改善に関する研究 —特に燃料性状とメタン添加の影響について—

A STUDY OF COMBUSTION IMPROVEMENT FOR SMALL GAS ENGINE
- ESPECIALLY INFLUENCE OF FUEL PROPERTIES AND METHANE ADDITION -

落合 浩史

Hiroshi Ochiai

指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In recent years, natural gas and petroleum gas have attracted attention as environmentally friendly fuel. In terms of fuel shift from coal to natural gas, including not only passenger cars but also generators, both production and share rate are increasing compared to other alternative fuels. Due to the shale gas revolution, the price gap between oil price and gas price has shrunk and the linkage between markets has dramatically increased, so it is expected that demand will expand for practical use. Applications include natural gas vehicles, cogeneration systems, etc. Gas fuel is expected to penetrate daily life in a wide range from commercial to home use.

This study has been carried out to examine the effects of fuel properties and methane addition for small gas engine. The combustion behaviors, such as emissions (NOx, CO HC), fuel consumption and net thermal efficiency.

The main results are as follows; 1) It is possible to control of combustion by changing the intake hole diameter for small gas engine. 2) It is possible to reduce the NOx emission by addition of methane for small gas engine.

Key Words: Gas engine, Exhaust characteristics, Methane fuel, Intake pore size

1. 緒論

近年、環境に配慮した燃料として、天然ガスや石油ガス(プロパンやブタン)が注目されている。乗用車などの運輸部門に加えて、発電部門では、石炭から天然ガスへの燃料転換という理由から、1次エネルギーに占める天然ガスのシェアは、2040年にかけて他の化石燃料(石油と石炭)と比較すると、唯一シェアを伸ばし、生産量も3284億 m^3 (2010年)から4955億 m^3 (2035年)と約1.4倍増加する事が予想されている。さらに、シェールガス革命を背景に、石油価格との連動性が強いガス価格の価格差が縮まってきた事から、石油ガスであるプロパン、ブタンは原油と比較して安価なものとなり、経済性の向上も期待されている。今後は、これまで以上に天然ガスを中心としたガス燃料が世界の基幹エネルギーとして大きな役割を担う事が期待されている。このような背景から、ガスエンジンの需要が高まっている。ガスエンジンは、ディーゼルエンジンと比較して大気汚染物質の排出量が極めて少ない事から、

天然ガス自動車普及に貢献するだけでなく、コージェネレーションシステムなどの発電機の普及も増大しており、発電容量は2010年で314億kwhから2030年では、約1000億kWhと約3倍近い導入量を目指している[1]。非常時のエネルギー供給を確保するために、導入場所も、学校、病院、商業施設を中心に数多く導入されており、産業分野では、化学、自動車業、食料品業界を中心に熱需要の多い分野に導入されている。この傾向を受けて、経済産業省から補助金などが支給されコージェネレーションシステムなどのガス発電機の導入を促し、技術向上やコストダウンに関する研究[2]が一層進められている。しかし、装置制約の条件もあり、小型ガスエンジンの研究は余り行われていない。

そこで、本研究では、著者のこれまでの研究[3]から、混合気性状を検討するため、吸入空気孔の孔径変更、また、メタン燃料を混合した際の機関特性、排気特性に及ぼす影響について考察を行った。

2. 実験装置及び方法

本実験で用いた実験装置の概略図を図 1, 図 2 にそれぞれ示す。図 1 は吸入空気孔の孔径変更を行った場合、図 2 は、メタンを混合させた場合の概略図である。また、エンジンの諸元を表 1 に示す。燃料には、東邦金属工業社製の REGULAR BUTANE GAS, SUPER BUTANE GAS(寒冷地用)の 2 種を使用した。SUPER BUTANE GAS には、イソブタンが配合されており、蒸気圧が高い事から、過濃領域の燃焼条件を想定している。なお、燃料性状、実験条件、実験結果を表す際に、Normal butane を N、 Iso butane を I と表記する。

図 1 の孔径変更では、キャブレターと接続している指定孔径に加工を施し、元々の供試機関である孔径がΦ18 とあるのに加えて、Φ9, 17, 19 の合計 4 つの孔径で排気ガス測定を行った。また、ノルマルブタン、イソブタンともに、吸気孔径をパラメータとして燃料消費量を測定した。

図 2 のメタンガスの混合では、定格出力時、Φ18 と固定し、供給圧を 0.1MPa と設定して、元々のカセットボンベから供給されるブタンガスと混合させ、燃料とした。カセットボンベから供給されるブタンガスは液体のまま機関混合室へ流入し、そこで気化し、空気と混合され、予混合気の状態では燃焼室へ導入した。メタンガス流量調整には、ガスボンベとキャブレターの間、ニードルバルブを設置し、流量調整を行いながら、質量流量計 (CMS0005 アズビル社) でモニタリングを行う事でブタン燃料と混合させた。また、メタンガスの流量は、ブタン燃料消費量の 25, 50, 75, 100%分を追加混合し、燃料として送り込んだ。

表 2 に実験条件を示す。今回、メタン添加時の実験条件として、負荷に関わらず、回転数を定格出力時一定のものとするエコ切モードと、負荷によって回転数を変化させるエコ入モードの両方で実験を行った。また、今回の実験で使用した燃料の燃料性状を表 3 に表記し、物性値は常温下での値とした。

実験手順としては、供試機関で 10 分程度暖機運転した後、新品のボンベ (全質量 350g) を取り付け、負荷を変化させた。負荷は 0-900W までを 300W 刻みで 4 段階に変化させた。各負荷での排気表示がほぼ定常値を示した後、1 回の測定につき、15 回表示された値を読み取り、平均化した。これを 5 回行い、得られた平均化データをさらに平均化し、各負荷における結果とした。排気ガス測定には自動車排ガス分析計 (Auto5.1 リエロジャパン社) を使用し、NO_x, CO, CO₂, O₂, HC の 5 成分を測定し。また、各孔径、燃料性状において燃料消費量を測定した。

本実験では機関特性の値として、吸入空気孔の孔径変更、メタン燃料添加の際、正味熱効率を算出した。

熱効率を η [%], 投入した熱量 Q [MJ], 低位発熱量 H [MJ/L], 仕事 L [MJ], 燃料消費量 X [L/min] とすると、熱効率は、(1) 式で表される。

$$\eta = L/Q = L/(H \times X) \quad (1)$$

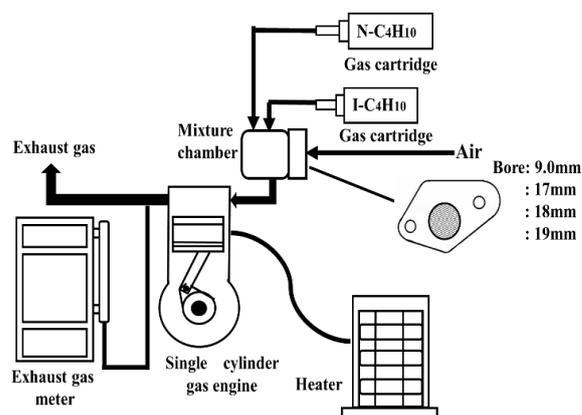


Fig.1 Experimental apparatus (intake air pore size change)

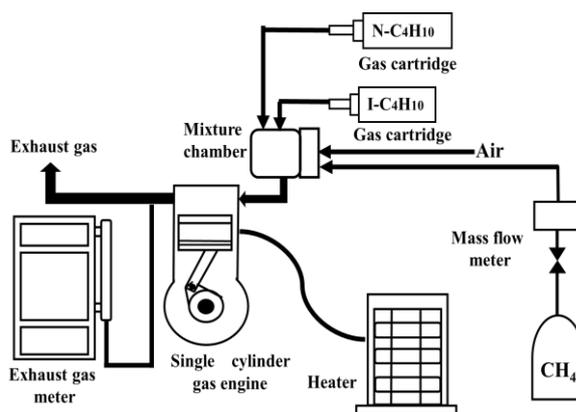


Fig2. Experimental apparatus (methane gas mixture)

Table 1 Engine specifications [3]

Engine type	4 stroke cycles single engine
Cooling system	Air cooling
Displacement	57.3cm ³
Valve system	OHV
Compression ratio	8
Ignition system	Transistor type magneto ignition
Type of fuel	LPG (Liquid butane)
Rated output	900W
Rated frequency	50Hz/60Hz

Table 2 Experimental apparatus (methane gas mixture)

Additional rate	Unit	N off	N on	I off	I on
0%	L/min	0	0	0	0
25%	L/min	0.74	0.69	0.73	0.69
50%	L/min	1.48	1.34	1.47	1.38
75%	L/min	2.21	2.06	2.20	2.07
100%	L/min	2.95	2.75	2.93	2.76

Table 3 Fuel properties [4]

Item	Unit	Methane	N butane	I butane
Molecular weight	g/mol	16.04	58.12	58.12
Density	kg/m ³	0.6784	2.5379	2.5303
Specific gravity	-	0.5547	2.0749	2.0687
Specific heat	kJ/(kg/K)	2.2259	1.6581	1.6657
Boiling point	K	111.65	231.11	272.65
Stoichiometric air	m ³ /m ³	9.561	32.082	31.986
Higher Heating value	kJ/kg	50,374	49,525	49,383
Lower Heating value	kJ/kg	50,040	45,741	45,594
Vapor pressure	kPa	-	378.5	527.6

3. 実験結果及び考察

3-1 吸入空気孔の孔径変更による排気性状

図3に各負荷条件に対するCO排出量を、燃料性状と吸入孔径をパラメータとして示す。図中のNはREGULAR BUTANE GAS, IはSUPER BUTANE GASをそれぞれ示し、実線はノルマルブタン、点線はイソブタンを示す。この図から、本実験範囲内で、Φ17, 18, 19では、孔径変更に伴うCO排出濃度に及ぼす影響は観察されなかったが、一方、Φ9では、他の孔径よりも、二つの燃料共に、CO排出量は増大している事が確認された。これは、孔径を大きく絞った事で、吸入空気量が減少し、燃料濃度が量論側から過濃側へ移行したために、燃焼温度が上昇しなかった為と考えられる。また、燃料性状に関して、CO排出量に著しい影響が確認されず、同程度となっている。これは、各負荷条件において、良好な燃焼が実現されており、不完全燃焼によるCO発生割合が極めて少なかったと考えられる。

図4に各負荷条件に対するHC排出量を、燃料性状と吸入孔径をパラメータとして示す。この図から明らかなように、Φ9を除いて、HC排出量は、各負荷において、ほぼ同程度である事が確認された。本結果は、CO排出量の結果とほぼ一致している。これは、各負荷条件において、良好な燃焼が実現されており、不完全燃焼による未燃物質の排出割合が少なかったものと考えられる。しかし、Φ9では、高負荷になるにつれて、HC排出量が減

少している事が確認された。これは、最初に孔径を著しく絞る事で、他の孔径を使用した時よりも、燃料濃度が過濃条件であったため、混合気の温度上昇が促進されず、低負荷時において、未燃物質が大幅に増加したと考えられる。また、燃料性状で比較検討すると、Φ17, 18では、イソブタンの方がノルマルブタンよりも、HC排出量は多い事が確認された。これは、イソブタンの方がノルマルブタンと比較して、各負荷時において、燃焼温度が低い事を示唆しており、イソブタンは蒸気圧が大きい為、液滴状態の燃料が減少し、ノルマルブタンよりも過濃条件である事、また、側鎖構造を持つイソブタンの方が、直鎖構造を持つノルマルブタンに比べて、燃焼速度が遅いため、燃焼期間が長期化した事で、筒内の総燃焼割合が減少し、燃焼温度が低下した為だと考えられる。

図5に、同様に各負荷条件に対するNO_x排出量を示す。どの孔径、燃料性状においても、負荷増大に伴って、NO_x排出量が増加している事が確認された。これは、負荷増大に伴って、吸入空気量が増大し、燃焼温度が増大した事により、サーマルNO_xの排出量が増加した為と考えられる。また、孔径を絞る事で、NO_x排出量が著しく減少する事が確認された。これは孔径を絞る事で、吸入空気量が減少し、燃焼温度が低下したために、燃料濃度が量論側から過濃側に移行した為と考えられる。また、燃料性状で比較検討を行うと、負荷増大に伴って、Φ18, 17の時のノルマルブタンの方が、イソブタンよりもNO_x排出量が多くなっていく事が確認された。特に、900W時では、Φ17, 18共に100ppm近い差異が生じた。これは、イソブタンは蒸気圧が高いため、燃料濃度が過濃側である事から、混合気の燃焼温度がノルマルブタンと比較して低く、また、側鎖を持つイソブタンの方が、燃焼速度が遅いため、燃焼期間が長期化し、筒内の総燃焼割合が低下した為、燃焼温度が低下した事に起因すると考えられる。

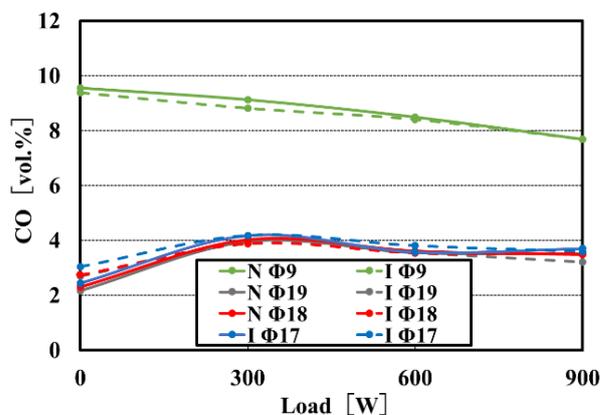


Fig.3 CO emission

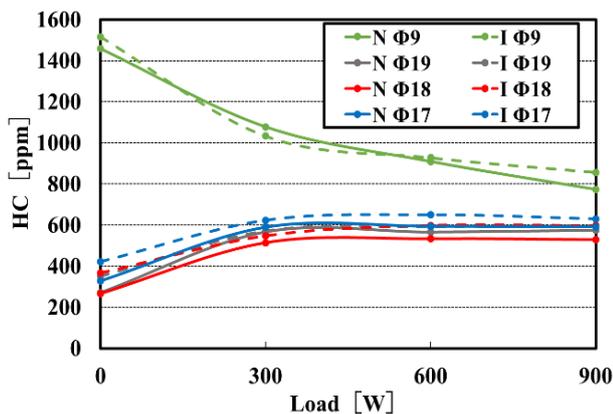


Fig.4 HC emission

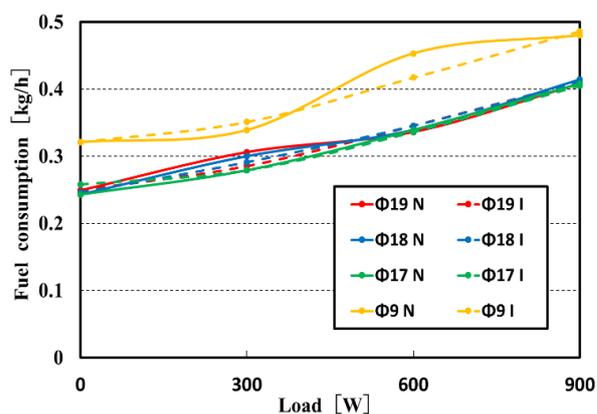


Fig.6 Fuel consumption

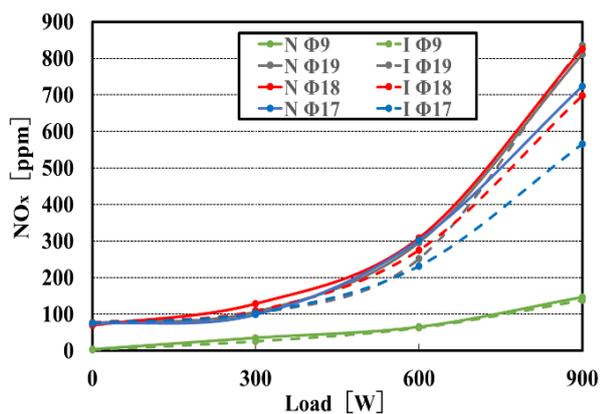


Fig.5 NOx emission

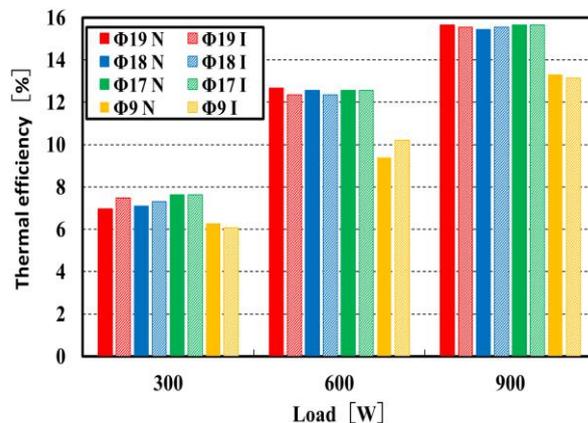


Fig.7 Thermal efficiency

3-2 機関特性

図6に各負荷条件に対する燃料消費量を、燃料性状と吸気孔径をパラメータとして示す。この図から明らかなように、負荷が増大するのに伴って、燃料消費量が増加している事が確認された。これは、負荷増大に伴って、吸入空気量が増大し、負圧が大きくなった事で、キャブレターから供給される燃焼消費量も増加した為と考えられる。

図7に、吸気孔径、燃料性状をパラメータとして、各負荷条件に対する正味熱効率を示す。この図から、負荷増大に伴い、正味熱効率は上昇する事が確認された。これは、負荷増大に伴い、吸入空気量が増大し、燃焼温度が上昇し、完全燃焼割合が増加した為と考えられる。また、吸気孔径で比較を行うと、Φ9は、他の孔径より各負荷条件において、正味熱効率が減少している事が確認された。900W時、Φ9では、他の孔径と比べて、2ポイント近い差が観察された。これは、各負荷において、より多くの燃料が消費されたため、正味燃料熱効率が低下したと考えられる。また、燃料性状で比較すると低負荷において、Φ19、18、17の孔径では、ノルマルブタンの方がイソブタンより低い事が観察されたのに対して、高負荷時では、ほぼ同程度である事が確認された。今後、機関特性に及ぼす燃料性状、構造異性体の影響を詳細に検討していく予定である。

3-3 メタン添加混合による排気性状の影響

表4に、エコ切、エコ入りモードでの各負荷における機関回転数の測定結果を示す。この表から、エコ切では、負荷に関わらず、回転数が一定であり、エコ入では、負荷によって回転数が変化する事が確認された。

Table 4 Engine speed

Load [W]	0	300	600	900
Eco off [rpm]	5500	5500	5500	5500
Eco on [rpm]	5135	4000	4230	4800

図8に孔径Φ18、定格出力を固定条件として、横軸にメタン混合率、縦軸にCO排出量、パラメータに吸気孔径の場合と同様に燃料性状の表記、また運転モードとしてエコ切をoff、エコ入をonとして表記する。この図から、メタン混合率を上げると、CO排出量が増加する事が確認された。これは、メタン燃料の混合率増大に伴い、燃料濃度が過濃側に移行したために、燃焼温度が低下し、不完全燃焼割合が増加したからだと考えられる。また、燃料性状で比較すると、イソブタンの方が、ノル

マルブタンより、CO 排出量が多い事が観察されており、吸気孔径での燃料性状による CO 排出量の差異と同じ要因であると考えられる。また、運転モードで比較を行うと、両燃料共に、エコ入状態の方は CO 排出量が多い事が観察された。これは、Table 4 より 900W 時の機関回転数が、エコ入の方が 700rpm 程度低い事が確認された事から、吸入空気量が減少した為、CO の酸化反応が促進されず、不完全燃焼物質として排出されたと考えられる。

図 9 に孔径 18、定格出力を固定条件として、横軸にメタン混合率、縦軸に HC 排出量、パラメータを同様に示す。この図から、メタン混合率の増大に伴い、HC 排出量が増加している。これは、CO 排出量増加と同じ要因であると考えられる。また、燃料性状着目すると、同一運転モードではノルマルブタンよりもイソブタンの方が、各メタン添加率で、HC の排出量が増大している。さらに、運転モードで比較するとエコ切の場合は、メタン添加率の増大に伴って、ノルマルブタンとイソブタンの HC 排出量の差異が増加している。これは、メタン添加率の増加に伴い、メタン混合ガスの燃焼速度が低下し、燃焼期間が長期化した事で、未燃物質が増加したと考えられる。

図 10 に、同様な条件で横軸にメタン混合率、縦軸に NO_x 排出量を示す。この図から、メタン燃料の混合率の増加に伴い、NO_x 排出量が減少する事が確認された。また、NO_x 排出量では、25%のメタン燃料の添加以降、各添加率で一定の減少量が確認された。これは、メタン燃料の添加により、燃料濃度が過濃側に移行した事で、燃焼温度が低下し、サーマル NO_x が減少した為だと考えられる。特に、メタン 25% 添加時に著しい減少傾向が見られた。これは、過濃領域で可燃限界近傍に移行する事により、燃焼温度が低下したことに起因すると考えられる。

3-4 メタン混合燃料における正味熱効率

図 11 に横軸にメタン混合率、縦軸に熱効率、パラメータを燃料性状、運転モードとして表記する。この図から、各運転モードにおいて、熱効率は燃料性状の影響を余り受けない事が観察された。すなわち、小型ガスエンジンにおいては、全負荷領域において、混合燃料による燃焼制御が可能である事が示唆される。

今後、空燃比を定量的に制御し、混合気性状が排気、機関特性に及ぼす影響を検討していく予定である。

4. 結論

本研究では小型ガスエンジンを用いて、燃焼生成物濃度に及ぼす吸気孔径の変更及び燃料性状に関する検討を行った。以下に結論を示す。

- (1) 小型ガスエンジンにおいては、吸気孔径の変更により、燃焼制御が可能である。
- (2) 小型ガスエンジンにおいては、メタン添加により、NO_x の排出低減が可能である。

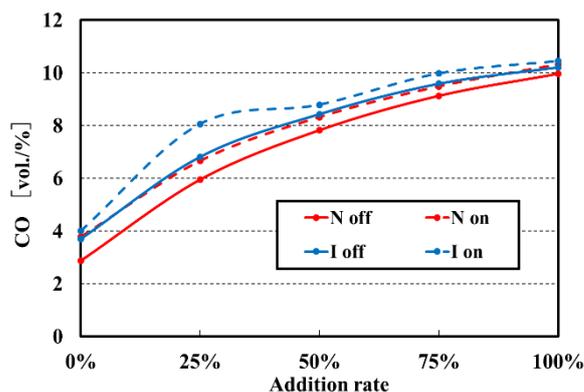


Fig.8 CO emission

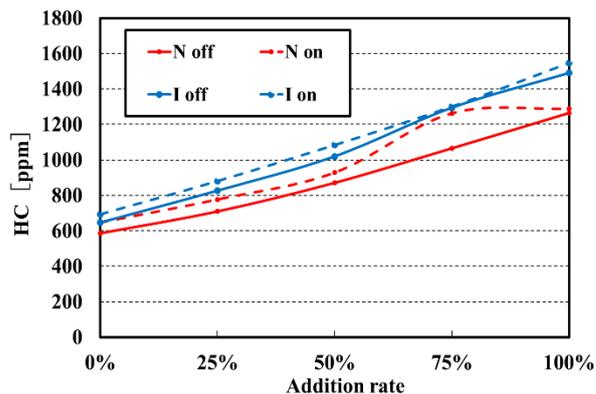


Fig.9 HC emission

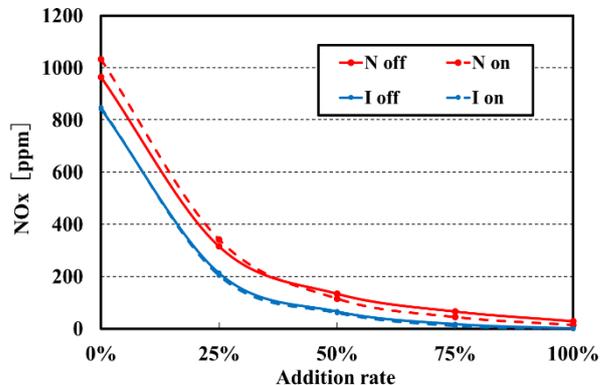


Fig.10 NO_x emission

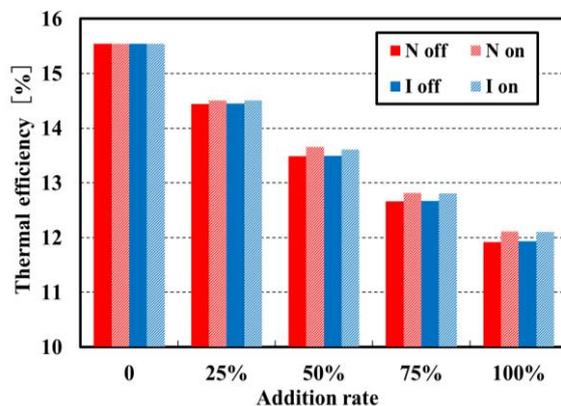


Fig.11 Thermal efficiency

謝辞：

本研究を進めるにあたり、終始ご指導下さいました川上忠重教授に心より深く感謝し、御礼申し上げます。

また、ワークショップの小山様、田中様、橋本様、伊勢崎様、添田様に於かれましては、実験装置の作成に大変ご尽力を頂戴し、厚く御礼申し上げます。皆様から学ぶことも多く、今後の糧とし参ります。

参考文献

- [1] 兼清 賢介：石油・天然ガス開発の仕組み，化学工業日報社 P248
- [2] 片岡克己・他3名，“定容燃焼器を用いた天然ガスエンジン燃焼特性に関する基礎的研究”，日本機械学会論文集B編，Vol.62, No. 596，1638-1643, 1996
- [3] 落合浩史，川上忠重：“メタン混合燃料を用いた小型ガスエンジンの燃焼特性に関する研究”
山梨講演会 2017 講演論文集，[No.402]，2017
- [4] 日本LPガス協会 LPガスの性質
<http://www.j-lpgas.gr.jp/intr/seishitsu.html>