ガスエンジンとディーゼルエンジンとの
コンバイン EGR システムによる排ガス改善*

柳 東 勲** 藤 田 浩 嗣*** 原 野 亘***

Exhaust Gas Recirculation in Combined System of Gas Engine and Diesel Engine

By Dong-Hoon Yoo, Hirotsugu Fujita, Wataru Harano,

In a combined system of the diesel and gas engine, the EGR method can easily be designed to reduce total NOx emission in the system, such as with LNG ships. The problem of the EGR system is the high PM concentration that causes some engine troubles. This can be reduced by mixing the exhaust gas from a gas engine into the intake air of a diesel engine. The EGR ratio was limited at 17% of the intake oxygen concentration, and without an increase of PM and CO. The system can be designed in full consideration of the displacement of both engines for practical use.

1. まえがき

1960 年代に LNG 船が登場して以来、世界的な天然ガス需要を受けて LNG 船の建造量は持続的に増加している。LNG 船においても大型化・効率化が進展し、最近では LNG BOG(Boiled Off Gas)を、海水を利用して再液化させ LNG 貨物倉に戻す技術が装備されており⁽¹⁾⁽²⁾、タービンに換わってディーゼルエンジンを主機関とする船用システムが増加することも予想される。

しかしながら、船用ディーゼルエンジン排気ガス中の NOx, SOx, CO および PM(Particulate Matter)は人間や環境に悪影響を与えており、これら排出物質低減のために SCR(Selective Catalytic Reduction), EGR(Exhaust Gas Recirculation), Emulsion 油使用および海水電解スクラバー⁽³⁾等による方法が研究されている。ディーゼルエンジンの EGR では排ガス中に機関トラブルの要因となる微粒子を多く含んでいるため適用が困難である。

本研究ではガスおよびディーゼルの両機関が搭載される LNG 船舶において、ディーゼルエンジンに比べて粒子状物質が少ないガスエンジンの排気をディーゼルエンジンの吸気に混合して再循環する方法によって NOx 総排出量を低減するコンバイン EGR システムを考案し、その特性および適用性を明らかにした。

実験では PM 排出量の少ない都市ガス使用ガスエンジンと A 重油を用いたディーゼルエンジンで EGR システムを構成し、空気とガスエンジンの排ガスを酸素濃度率で調整して混合し、ディーゼルエンジンの回転数と負荷を変化させ、ディーゼルエンジンの燃焼特性と排ガス濃度の変化を測定した。ガスエンジン、ディーゼルエンジン各々単体で運転した時の NOx, PM 排出量および燃料消費率を比較して検討を行った。

なお、ガスエンジンは実際の船舶機関システムでは発電機原動機として使用されることを想定して定負荷、定回転数の条件で運転し、ディーゼルエンジンは船舶推進機関としての使用を想定して、負荷、回転数を変化させた。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置の構成を示す。ガスエンジンの排ガス(EGR ガスとしての導入量)は排気管途中の二つに分岐されたバルブを使って調節する。排ガスの脈動を緩和するため、ガスエンジン排気部とディーゼルエンジンの吸気部にそれぞれサージタンクを設けた。大気と混合調整した EGR ガスがディーゼルエンジンの吸気となる。なお、EGR クーラーおよび過給機は設置していない。

分析する排ガスは、ガスエンジン排気管、EGR 混合ガスサージタンク部、ディーゼルエンジン排気管に設けたサンプリング孔からそれぞれ吸引した。排ガス分

* 原稿受付 平成 20 年 4 月 8 日。
** 学生会員 神戸大学 海事科学研究科
*** 正会員 神戸大学 海事科学研究科

Fig 1. EGR system in combined engines

Table 1. Engine specification

Engine type	Gas Engine (KUBOTA NRG 1600G)	Diesel Engine (YANMAR NF19 SK)
Bore × stroke	120 × 170 (mm)	109.8 × 105.4 mm
Swept volume	1992 (cm ³)	988 cm ³
Maximum power	11.93(kW)/1100(rpm)	13.97(kW)/2400(rpm)
Rated power	10.07(kW)/900(rpm)	11.76(kW)/2200(rpm)
Combustion system	Spark ignition	Direct injection
Compression ratio	8:1	16.3:1
Ignition / Injection timing	BTDC 21°	BTDC 19±0.1°
Fuel	Natural gas	Marine diesel oil

析計へ導く各配管には凝縮水除去用のドレンポットを設置した。ディーゼルエンジンでは歪み式圧電センサーとA/D変換ボードを使って圧力線図を採取し、圧力と熱発生率を分析できるようにした。また、各機関には水動力計および燃料流量計を設置した。表1にガスエンジンとディーゼルエンジンの要目を示す。各機関の燃料にはそれぞれ都市ガス13A(メタン78%, エタン11%, プロパン7%, ブタン4%, 45MJ/m³_N)およびA重油(0.8528g/cm³, 2.42cSt, N分0.38%, S分0.08%, 42.7 MJ/kg)を使用した。

ガスエンジンの運転条件は回転数を900(rpm), 機関負荷を50%の定常運転状態を設定した。ディーゼルエ

ンジンの運転条件は回転数を2000rpm, 2200rpm, 連続出力に対する機関負荷25%, 50%, 75%との組み合わせとした。はじめにEGRをしていない各エンジン単独の運転状態での排ガス成分を測定し、次に、EGRシステムに設定して両機関による運転を行い、排ガス分析を行った。なお、ガスエンジン排ガスのディーゼル吸気へのEGRガス混合割合は、ディーゼル吸気中の酸素濃度、21%, 19%, 17%, 15%の4条件として設定した。酸素濃度はガス混合部の弁にて調節し、酸素計によって確認した。NOは化学発光法により測定し、燃料・排ガス分析および消費量から排ガスを燃焼計算して質量濃度に換算した。PM濃度は、20ℓの排ガスをガラス繊維フィルターに導き、乾燥後の付着量の質量を測定した。また同フィルターをジクロロメタン15mlに浸し、再度質量を計測することにより、可溶性有機成分(Soluble Organic Fraction, SOF)と不可溶性成分(Dry Soot, DS)の割合を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 燃焼特性 ガスエンジン単独運転の排ガス成分および大気と混合したディーゼル吸気成分を表2, 3にそれぞれ示す。

EGRガスを混合したディーゼル吸気の温度は37℃～42℃で安定しており吸気温度による燃焼への影響は少ないと考えられる。ディーゼルエンジン2200rpm条件での25%, 50%, 75%負荷時の圧力線図と熱発生率を図2(a),(b),(c)に示す。酸素濃度が減少(EGR率が増加)するとともに最高圧力, 平均圧力, 熱発生率は低下し

た。図(a)25%負荷, 15%酸素 EGR においては, 着火・燃焼不良な運転となった。李等⁽⁴⁾⁽⁵⁾の研究で確認されているように酸素比率 14%以下では, エンジンの回転数や負荷に対応した安定な運転ができなくなる。着火遅れは EGR 率の増加とともに長くなり, 後燃え期間が増加した。一般に EGR 率を増加すると吸気中の CO₂ 濃度の増加によって燃焼温度が低下し NO_x が低減される。本実験の場合は CO₂ 濃度の増加よりも O₂ 濃度の減少による効果が大いだと判断される。着火遅れが長くなり初期熱発生率が減少しているのも, 低い酸素濃度による化学的な遅れ, すなわち燃焼速度の低下が原因であると考えられる。

図 3 に燃料消費率を示す。中高負荷域ではほぼ一定であるが, 低負荷域では EGR 率の増加とともに燃料消費率も増加する傾向が見られた。酸素濃度 19%以下では燃焼不良が起こっていると判断される。コンバイン EGR システムにおいては低負荷領域での EGR は避け, 中負荷以上の領域での利用が勧められる。なお, 2000rpm の場合も 2200rpm の結果とほぼ同じ傾向であった。

Table 2. Exhaust gas concentration of gas engine

Number of rotations	900 (rpm)
Load	5.03 (kW) - 50%
Exhaust gas Temp.	570°C~580°C
SFC	2.104(m ³ /h) ,13A
CO ₂ / CO	7.32 (%) / 5.5 (%)
NO	7.2 (g/kWh)
O ₂	0.53 (%)
THC (CH ₄ base)	0.3 (%)

Table 3. Concentration of EGR gas

EGR Rate(oxygen)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
19%	0.56	18.98
17%	1.14	17.01
15%	1.54	15.03

(a) 2200rpm/Load25%

(b) 2200rpm/Load50%

(c) 2200rpm/Load75%

Fig2. Cylinder pressure and heat release at 2200rpm

Fig 3. Specific fuel consumption at 2200rpm

Fig 4. NO concentration at 2200rpm

3. 2 排ガス特性 NO は図 4 に示すように EGR 率の増加につれ、生成量が抑えられて減少している。高負荷ほど減少の程度は顕著になり、酸素濃度 15% の条件下では実測値が 150ppm 以下となり大幅に低減している。表 4 に各 O₂Ratio(EGR)条件における NO 低減率を整理した。NO 低減率(%)は単独機関(G/E, D/E)での NO 濃度の合計とコンバイン EGR システム(G/E & D/E)での NO 濃度との割合を示したものである。コンバイン EGR システムは NO 総合排出量の低減に効果がある。酸素濃度の減少と CO₂ による燃焼温度の低下がサーマル NO_x の抑制、着火遅れ期間の増加をもたらす、高温の反応時間が短縮される。

図 5 で、最終的に排出されるディーゼルエンジンからの CO₂ 濃度は EGR 率の増加に従い増加している。ガスエンジンから発生した CO₂ とディーゼルエンジンから発生した CO₂ 量が加算されたものと、ガスエンジンの CO がディーゼルエンジン内で再燃焼したものとが含まれると考えられる。また、負荷 75%, EGR 酸素濃度 15% の CO₂ が同負荷、酸素 17% より低下しているが、これは図 6 のディーゼル排ガス中の酸素濃度をみると酸素 15% の場合は 17% の場合よりもさらに酸素不足の状態であり、CO₂ 生成までの燃焼反応に至らなかったためである。排ガス中の酸素濃度は EGR 率が増加するによって減少し、負荷 75% の場合、EGR 酸素量 17% 以下ではほとんど消費されていた。当然ではあるが、このような酸素不足状態は最高圧力、熱発生率の低下、および PM の増加につながる。コンバイン EGR システムによる適当な酸素濃度は 20%~17% の範囲であると判断される。

Table 4. NO Reduction ratio at 2200rpm

O ₂ Ratio	G/E (g/kWh)	D/E (g/kWh)		D/E&G/E (g/kWh)	Reduction Rate (%)
19%	2.22	25%	9.73	2.84	76.23
		50%	12.35	8.14	44.13
		75%	14.25	8.93	45.78
17%	2.25	25%	9.73	1.97	83.56
		50%	12.35	2.75	81.16
		75%	14.25	3.88	76.46
15%	2.28	25%	9.73	2.54	78.85
		50%	12.35	1.95	86.67
		75%	14.25	2.10	87.27

Fig 5. CO₂ Concentration at 2200rpm

Fig 6. O₂ Concentration at 2200rpm

Fig 7. PM Concentration at 2200rpm

図7に排ガス中のPM質量濃度を示した。EGR率が高いほどPM濃度は増え、負荷75%の場合、酸素17%から急激に増加した。PMの増加成分は主にDS(Dry Soot)によるものであることがわかる。気相析出系の生成過程によるPMにおいてはDSの生成が酸素濃度に依存しており、酸素濃度の低下により炭化水素の燃焼酸化反応が阻害されて生成したものと考えられる。コンバインEGRシステムにおいても二律背反関係であ

るPMとNO_xの同時低減は非常に難しいが、吸気酸素濃度17%以上で制御すれば、PMの増加を抑えて効果的なNO_x低減が可能であるといえる。

4. まとめ

LNG船舶に代表されるガスエンジンとディーゼルエンジン併用プラントで利用できるコンバインEGRシステムを考案し、NO_xの低減を目的として排ガスを分析し以下の結論を得た。

1. EGR率を増加すると燃焼室圧力、熱発生率はそれぞれ減少した。EGR酸素率17%までの条件においては有効なNOの低減が見られた。回転数2200/負荷75%の場合、自然吸気状態と比べて76%程度の低減効果がある。
2. 燃料消費率はEGR率の増加とともに上昇するが、中負荷以上では増加量は少ない。
3. EGR率により総合CO₂排出量は変わらない。O₂濃度は低下し、COは吸気中の酸素濃度減少に伴って急激に増加する。
4. PM濃度は低負荷時にはあまり変化が見られないが、高負荷時には大幅な増加が見られ、ほとんどがDry Sootの増加によるものである。

ガスエンジンとディーゼルエンジンとの排気量割合を考慮したコンバインEGRシステムを設計し、吸気酸素濃度17%以上でEGR制御すればPMの増加を抑えながら効果的なNO_x低減システムが実現可能である。ディーゼル主機とガスエンジンの排気量対比では5:1程度が適合すると見積もられる。

参考文献

- 1) 糸山直之, LNG船-その変革と多様化, 船と海のサイエンス, 11号冬季(2005), 28-35
- 2) 青木陽一, LNG運送の新たな展開, 船と海のサイエンス, 11号冬季(2005), 36-41
- 3) 西田修身, 船舶ディーゼル機関から排出されるNO_x, SO_x及びPMの海水電気分解スクラバー法による処理装置の性能試験, 海と安全(2005,秋号), 40-43
- 4) 李鉄, 木戸伸吾, 小川英之, 超高EGR・低酸素ディーゼル燃焼の燃料性状依存性, 日本機械学会論文集B編, 72巻719号, 1857-1862, (2006.7)
- 5) 李鉄, 泉洋行, 首藤登志夫, 小川英之, 大量EGR・低温ディーゼル燃焼における未規制有害物質排出特性および排気触媒による浄化効果, 日本機械学会論文集B編, 73巻728号, 1129-1134, (2007.4)