

# PS-14 船用リーンバーンガス機関における燃料ガス組成の相違が 燃焼特性、排ガス特性、ノッキング発生特性に与える影響

環境・動力系 \*市川 泰久、ボンダレンコ、関口 秀紀、平田 宏一

## 1. はじめに

大気汚染防止等の海洋環境保全の観点から、船舶の排ガス規制が年々強化されている。このため、原油燃料に比べて環境負荷物質の排出量が少ない天然ガスを燃料とする船用ガス機関が注目されている。しかし、燃料となる天然ガスの組成は産出地や燃料貯蔵法等によって異なることが知られている<sup>1)</sup>。また、温室効果ガスである二酸化炭素の排出削減のために燃料ガスに水素を混合することも検討されている。一方、ガス機関の機関特性（燃焼特性、排ガス特性、ノッキング発生特性等）は燃料ガス組成の影響を受けることが知られており、これまで燃料ガス組成の相違が自動車用ガス機関の排ガス特性に影響を与えることが報告されている<sup>3)</sup>。自動車用ガス機関と船用ガス機関は燃焼条件や出力等が異なるため、燃料ガス組成の相違が船用ガス機関の機関性能に与える影響を把握することは、ガス燃料船の信頼性・安全性・環境性を維持するために重要である。前報では、都市ガスにプロパン主成分LPG(P-LPG)を混合した試験結果を報告した<sup>2)</sup>、本報ではさらにブタン主成分LPG(B-LPG)および純水素(H<sub>2</sub>)を混合し、燃焼特性、NO<sub>x</sub> 排出特性およびノッキング発生特性について試験した結果を報告する。

## 2. 実験・計測システムおよび試験方法

表 1 に本試験で用いたガス機関の諸元を示す。本機関は副室着火・希薄予混合燃焼方式のガス専焼火花点火機関である。図 1 に実験・計測システムの概要を示す。紙面の都合上、詳細な説明は記載しないが、第 6 気筒には筒内圧力センサを設置している。表 2 に本試験におけるガス機関の運転条件を示す。なお、ノッキング特性試験では、安全上、全気筒でノッキングが発生することを避けるため、筒内圧力を計測している第 6 気筒を進角させ、他気筒を遅角させた。また、本試験では、都市ガス（メタン約 90 Vol.%）に P-LPG（プロパン約 98 Vol.%）、B-LPG（プロパン約 27 Vol.%、ブタン 73 Vol.%）および H<sub>2</sub> を混合することによって、ガス機関に供給する燃料ガス組成を変化させた。この際、都市ガスに混合する P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の最大体積混合割合は、各ガス供給設備の制限上、各々 22%、14%、20%とした。なお、混合後の燃料組成はガスクロマトグラフを用いて分析を行った。

## 3. 試験結果

### 3. 1 燃焼特性に与える影響

表1 ガス機関の諸元

|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| ガス機関        | AYG20L-SE (Yanmar co., Ltd.) |
| 形式          | 希薄燃焼 / 火花点火 / 副室着火           |
| シリンダ径/行程    | 155 mm / 180 mm              |
| 気筒数         | 6                            |
| 発電出力 / 回転速度 | 400 kW / 1800 rpm            |

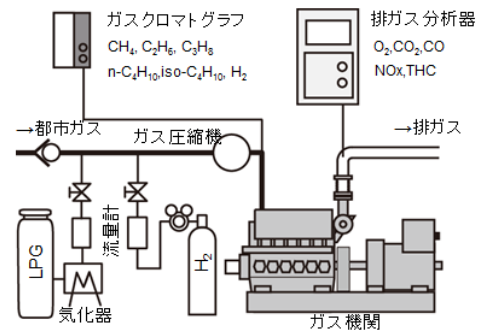


図1 実験・計測システムの概要

表2 ガス機関の運転条件

| 試験内容    | 燃焼特性<br>排ガス特性          | ノッキング特性      |
|---------|------------------------|--------------|
| 回転速度    | 1500 min <sup>-1</sup> |              |
| 発電出力    | 320 kW                 |              |
| 軸平均有効圧力 | 1.35 MPa               |              |
| 空気過剰率 λ | 1.85                   |              |
| 点火時期    | Cly.1-5                | -8 deg.ATDC  |
|         | Cly.6                  | -15 deg.ATDC |
| 給気温度    | 38 °C                  | 50 °C        |
| 副室流量割合  | 2.5 Vol.%              |              |

図 2 に都市ガスに混合する P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の体積混合割合に対する燃焼期間(燃焼質量割合 10-90% のクランク角度)、平均最高筒内燃焼圧力(Pmax)および最高筒内燃焼圧力の変動率(Pmax COV)の関係を各々示す。Pmax COV は、300 サイクル分の最高筒内圧力と平均最高筒内圧力の差分の標準偏差を平均最高筒内圧力で除した値である。Pmax COV はサイクル毎にどの程度燃焼に変動があるかを示し、機関の燃焼安定性の指標となる。同図(a)において、P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の体積混合割合の増加に伴い燃焼期間が短くなり、P-LPG および B-LPG の体積混合割合を 15 Vol.%とした場合には約 0.5 deg.程度、H<sub>2</sub> の体積混合割合を 15 Vol.%とした場合には約 2.0 deg.程度、燃焼期間が短縮することが確認できる。また、同図(b)から、Pmax は P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の体積混合割合の増加に伴い増大し、この Pmax の増大は燃焼期間の短縮に起因していると考えられる。一方、同図(c)から、Pmax COV は P-LPG、

B-LPG、H<sub>2</sub>の混合に対してほとんど変化がなく、この体積混合割合の範囲では燃焼が安定していることを示している考える。

### 3. 2 NO<sub>x</sub> 特性に与える影響

図 3 に都市ガスに混合する P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の体積混合割合に対する NO<sub>x</sub> の排出率を示す。同図から、NO<sub>x</sub> の排出率は、P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の体積混合割合の増加に伴って増大する傾向があることが確認できる。このような傾向は、燃料ガス組成が変化したことによって筒内圧力が高まり主室内火炎温度が上昇したことや、副室燃焼ガスジェットの活性化したこと等が要因であると考えられる。

### 3. 3 ノッキング特性に与える影響

本試験におけるノッキングの強さを表す KI(Knock Intensity)値は、シリンダ直径と音速から推定されるノッキング周波数やノッキングを発生させる予備試験の結果等の検討を踏まえ、「筒内圧力波形に対して本機関ノッキング周波数である 3.5-4kHz でバンドパスフィルタを掛け、得られた波形の絶対値に対する積分値を積分時間で除した値を瞬時 KI 値とし、300 サイクル内で瞬時 KI 値 > 35 kPa を抜き出して合算しサイクル数で除したもの」として定義した。図 4(a)に KI 値と体積混合割合の関係、図 4(b)にメタン価(MN)と KI 値の関係を各々示す。MN は燃料の耐ノッキング性を表す燃料指標であり、数値が小さい燃料ガスほどノッキングが発生しやすいことを示す。なお、P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub>の混合はいずれも MN を低下させる効果がある。同図(a)より P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> の体積混合割合が増加すると KI 値が増大しノッキング強度が高まっていることわかる。また、この増大傾向は、混合する燃料種によって大きく異なることが確認できる。一方、同図(b)では P-LPG、B-LPG、H<sub>2</sub> のいずれの燃料を混合した場合でも MN と KI 値の関係性は概ね同一曲線上にあることがわかる。この結果から、従来の自動車用ガス機関の燃焼条件で定められた MN は、船用リーンバーンガス機関の燃料ガスの耐ノッキング性の評価に対しても有用であると考えられる。

## 4. まとめ

副室式リーンバーンガス機関を船舶で用いる場合、燃料ガス組成の影響は、空気過剰率一定の条件で制御されれば、燃焼特性に対しては大きな影響は及ぼさない。ただし、水素混合された燃料ガスを用いる場合は、燃焼期間短縮に伴う最大燃焼圧力の増加に配慮する必要がある。また、環境規制の対象となっている NO<sub>x</sub> 排出率は C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> や C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、H<sub>2</sub> の増加によって増大する。また機関を損傷する危険があるノッキング発生特性については、燃料ガス組成の影響が顕著に現れるため注意を要する。ただし、船用ガス機関の燃料ガス組成の

相違に起因して発生するノッキングは、MN を用いることで管理することが可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26820386 の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。本研究の実施にあたり、元海上技術安全研究所 柳東勲氏から多大な協力をいただいた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 宇井、第 83 回マリンエンジニアリング学会学術講演会論文集(2013)、205-208
- 2) 市川ら、海技研研究発表会講演集(2015)、234-235
- 3) 石井ら、自動車技術会論文集 27 巻 4 号(1996)、21-26

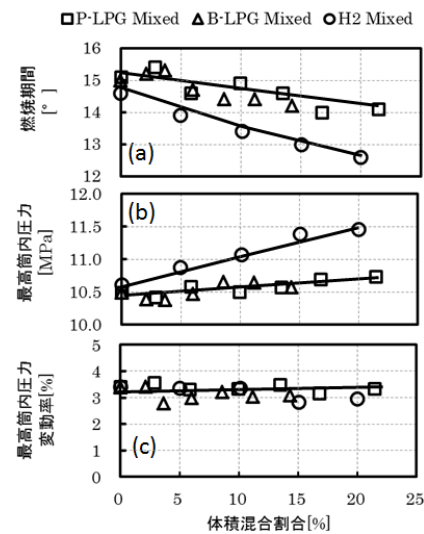


図 2 燃焼特性への燃料ガス組成の影響

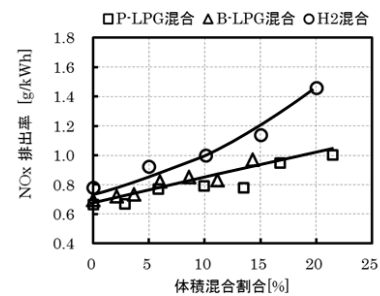


図 3 NO<sub>x</sub> 排出率への燃料ガス組成の影響

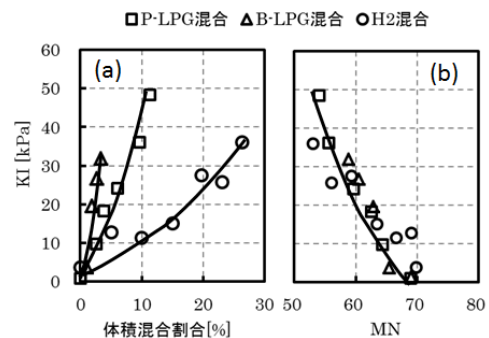


図 4 ノッキング強度への燃料ガス組成の影響