リーンバーンガス機関の適正制御パラメータと ガス燃料組成の影響に関する研究

市川 泰久*, 関口 秀紀*, Oleksiy Bondarenko*仁木 洋一*, 新田 好古*, 平田 宏一*

Studies on the Proper Control Parameters and the Effects of Gas Composition on Lean Gas Engine

by

Yasuhisa ICHIKAWA, Hidenori SEKIGUCHI, Oleksiy Bondarenko, Yoichi NIKI, Yoshifuru NITTA and Koichi HIRATA

Abstract

Recently, the International Maritime Organization (IMO) has strengthened the air pollutant emission regulations for ships from the viewpoint of prevention of global warming and air pollution. In order to correspond to the regulations, marine lean burn gas engines using natural gas have attracted attention in the maritime industry, because the emissions from the lean burn gas engines are low compared with those from conventional diesel engines. The further reduction of the emissions from the lean burn gas engines can further contribute to the preventions of global warming and air pollution.

In the present study, we have experimentally investigated the effect of fuel gas composition on the combustion, emission and knocking characteristics of a marine lean burn gas engine, which has a rated power output of 400 kW and a spark ignition pre-chamber system.

 ^{*} 環境・動力系
 原稿受付 平成30年2月6日
 審査日 平成30年3月7日

1.	まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・)
2.	リーンバーンガス機関実験設備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
	2.1 リーンバーンガス機関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
	2.2 機関特性計測用実験・計測システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
3.	リーンバーンガス機関の適正制御パラメータの検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	3.1 試験方法・条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	3.2 試験結果······	1
	3.3 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44	5
4.	ガス燃料組成の相違がリーンバーンガス機関の性能に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
	4.1 実験方法・条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
	4.1.1 ノッキング強度算出法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	4.1.2 メタン価算出法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・)
	4.2 実験結果····································)
	4.2.1 燃焼特性, NOx 排出特性・・・・・50)
	4.2.2 ノッキング発生特性とメタン価の有効性検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
	4.2.3 ノッキング発生特性の給気温度の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52	2
	4.3 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
5.	あとがき・・・・・ 52	3
諌	辞	3
参	考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3

1. まえがき

地球温暖化防止や大気汚染防止等の環境保全の観点から、国際海事機関(IMO)は船舶からの排出物に対する 環境規制を強化している^{1),2)}.これに伴い、重油に比べて燃焼過程で生成される環境負荷物質(二酸化炭素(CO₂: carbon dioxide)や窒素酸化物(NOx: nitrogen oxide)、硫黄酸化物(SOx: sulfur oxide)、粒子状物質(PM: Particulate Matter)、ブラックカーボン(BC: Black carbon)等)の排出量が少ない天然ガスを燃料とするガス機関が注目されて いる.このガス機関は、大別して、高圧(20~30MPa)の天然ガスを圧縮後のシリンダ内に直接噴射しディーゼ ル燃焼(噴流拡散燃焼)させるガスインジェクション方式(GI: Gas Injection)と、あらかじめ燃料と空気を燃料 希薄の状態で混合した予混合気をシリンダ内に供給し圧縮後に着火・燃焼行う希薄予混合燃焼方式(リーンバー ン方式)に分けられる。リーンバーン方式はガスインジェクション方式と比較し、燃焼温度が低く NOx 排出率が 低いが、予混合気特有の異常燃焼(ノッキング、失火、過早着火)が発生する場合がある.このため、現在の舶 用リーンバーンガス機関は、高度な燃焼技術、制御技術、モニタリング技術を駆使することによって、この異常 燃焼を抑制・回避し、高い安定性、信頼性、環境適合性を担保している.このような背景から、小型高速から中 型中速の舶用ガス機関は近年リーンバーン方式が多く採用され、今後内航船主機や外航船補機として普及が進む と考えられている.

当研究所では、2013年にリーンバーンガス機関実験設備を導入・整備し、舶用リーンバーンガス機関の安定性、 信頼性を維持しつつ更なる熱効率向上や環境負荷物質排出削減を目指した排気再循環(EGR: Exhaust Gas Recirculation)技術や水噴射技術等の要素技術、および、天然ガスを主燃料として水素やバイオガス等を混合しガ ス機関において混焼することにより、特に二酸化炭素排出を大幅に削減する技術の研究・開発を進めている.ま た、リーンバーンガス機関の燃料となる天然ガス性状が供給地域や貯蔵状態によって異なることから、天然ガス の燃料性状がリーンバーンガス機関の燃焼・排気特性に与える影響について調査を行っている³. 本稿では、船用リーンバーンガス機関の熱効率向上や環境負荷物質排出削減を目指して推進している上記技術 を適用する上で重要となるリーンバーンガス機関の適正制御パラメータについて検討した結果を紹介すると共に、 燃料となる天然ガスの燃料性状がリーンバーンガス機関の燃焼・排気特性に与える影響について調査した結果を 報告する.

2. リーンバーンガス機関実験設備

本章では、2013年に当研究所が導入したリーンバーンガス機関を紹介すると共に、機関特性(燃焼・排気特性 等)を計測するために構築した実験・計測システムの概要を解説する.

2.1 リーンバーンガス機関

図1にリーンバーンガス機関の概観,図2にその構造と構成,表1にその諸元をそれぞれ示す.本ガス機関は, 定格発電出力400kW,回転速度1800min⁻¹の補機特性を持ち,着火方式に副室火花点火方式を用いたガス専焼リー ンバーンガス機関である.燃料ガスは都市ガス(13A)を用い,その供給方式は,各気筒給気連絡管に設置され たガスインジェクタによるポートインジェクションシステムとなっている.

本ガス機関は、通常、機関回転速度が一定となるように燃料ガス噴射期間が制御されており、空気過剰率(空 燃比)は過給気コンプレッサ出口に設置されたスロットルバルブを用いて給気マニホールド圧力を制御すること によって調整が行われている.なお、点火時期、空気過剰率等のガス機関制御パラメータは変更することが可能 である.



図1 リーンバーンガス機関の概観



図2 リーンバーンガス機関の構造と構成

名称	AYG20L-SE(ヤンマー)
発電出力 / 回転速度	400 kWe / 1800 min ⁻¹
燃焼方式	ガス専焼/副室火花点火
	/希薄燃焼
ボア/ストローク	155 mm / 180 mm
気筒数	6 気筒
総行程容積	$20 \mathrm{L}$
負荷	発電機+抵抗器
使用燃料	都市ガス(13A)

表1 ガス機関の諸元

2.2 機関特性計測用実験・計測システム

図3に本ガス機関を運転し機関特性を計測するために構築した実験・計測システムの概要を示す. 同図に示す ように、本ガス機関は、発電機・制御盤を介して接続された乾式電気負荷装置により、発電負荷が調整できるよ うになっており、ガス機関運転時の負荷制御は、PLC(プログラマブル・ロジック・コントローラ)を用いて遠 隔操作可能な構成としている.

また、本ガス機関の排気特性を計測するため、排気管には排気組成(酸素(O₂), CO₂, 一酸化炭素(CO), NOx, 全炭化水素(THC: Total Hydro-Carbon))分析用の排気分析装置(HORIBA MEXA-1600 DEGR),ガス機関の燃料ガス 供給管には燃料ガス流量計と燃料ガス組成(H₂およびアルカン系低級炭化水素)を分析するためのガスクロマト グラフ(Agilent Tech. 490 Micro GC)を設置している.なお、これら排気組成分析結果、燃料ガス流量計測結果、燃 料ガス組成分析結果から炭素バランス法⁴⁾を用いて給排気流量を推定することが可能となっている.



図3 ガス機関の実験・計測システムの概要

さらに、本ガス機関の燃焼特性を計測するため、第6気筒には各種センサ(筒内圧力センサ、排気圧力センサ、 点火電圧プローブ)、ガス機関クランク軸端にはロータリエンコーダ、第6気筒の筒内にはピエゾ式燃焼圧力セン サ(kistler 製 6041B)を設置している.なお、圧力センサ信号は、サンプリング周期をエンコーダA相信号に同 期したクランク軸2回転(1サイクル)とし、角度分解能を0.5 deg.として取得している.さらに、筒内圧力センサ 信号について、サンプリング期間をクランク角度の燃焼上死点後(ATDC: After Top Dead Center)-60~+90 deg.と し、時間分解能を4.1 µsec.(角度分解能約0.036 deg.,サンプル数4096 点)としても取得している.さらに、筒 内圧力センサ信号の取得では、エンコーダA相信号も同時に取得することによって、サンプリング時間に対応す るクランク角度を算出している.

本実験・計測システムにおいて,試験中の各種エンジン計測データ(発電電力,回転速度,各部圧力・温度, 各部燃料ガス流量,排気組成分析結果,燃料ガス組成分析結果,エンジンコントロールユニット(ECU)データ) は、全て機関性能解析 PC に取り込み,各種性能(給排気流量,空気過剰率,燃料物性,熱効率,エネルギーバ ランス等)のリアルタイム解析を行い,モニタへの表示と保存を行う構成としている.

なお、同図中の燃料組成変更装置は、後述する4章において本ガス機関に供給する燃料ガス組成を変更するための装置であり、都市ガス(13A)に LPG および水素を混合することを可能としている.

3. リーンバーンガス機関の適正制御パラメータの検討

本研究では、ガス機関の高効率化を目指した EGR 技術や水噴射技術、および、ガス機関からの二酸化炭素排 出量削減を目指した水素またはバイオガス混焼技術の研究・開発を進めているが、これらの技術を既存のガス機 関に適用した場合、従来の機関特性が変化する可能性がある.そこで、本章では、今後上記技術を適用する上で 重要となるリーンバーンガス機関の運転条件、機関特性、制御パラメータの関係性を明らかにする.

3.1 試験方法·条件

本リーンバーンガス機関は、前述のようにガス燃料と空気を混合した後にピストンで圧縮し、副室内でスパー クプラグを用いて点火し、副室からの燃焼ガス噴流が主室内の未燃予混合気に着火し、火炎が伝播することで燃 焼が行われる.この予混合火炎の燃焼特性(燃焼温度や燃焼速度、自着火温度)はガス燃料と給入空気の混合割 合に大きな影響を受ける.このため、リーンバーンガス機関は給入空気量をスロットルバルブによって制御し、 適切な空気過剰率に調整することで安定した燃焼を維持している.また点火時期(火花点火を行うクランク角度) も燃焼過程のシリンダ内圧力に対し大きな影響を与え、サイクル特性(図示効率、最大筒内圧力)や燃焼特性(燃 焼期間、NOx 生成量)を決定する重要な因子となる.そこで、本試験では、3種の運転条件(機関出力と回転 速度)に対して、機関特性に大きな影響を与える制御パラメータ(空気過剰率と点火時期)を網羅的に変更 し、その試験結果から本ガス機関の適正制御パラメータ範囲を調査した.この際、ガス機関の機関特性限界 として下記の条件を設定した.なお、本機関特性限界は、本ガス機関の設計上の限界を示すものではない.

- ① NOx 排出率限界: NOx 三次規制の規制値を参考にし、2 g/kWh を限界とした.
- ② THC 排出率限界: THC 排出率は燃焼が不安定化する過程で急激に増大する。本ガス機関では、この急激な 変化のしきい値が 8 g/kWh 程度であったことから、この値を限界とした.
- ③ 発電効率限界:各運転条件で計測された最大発電端熱効率から,-2%LHV低下した条件を限界とした.
- ④ 最大筒内圧力(Pmax)限界:燃焼室周辺の構造強度に関係する限界で、参考値として13 MPa を限界とした.
- ⑤ 排気温度(過給機タービン入口温度)限界:過給機や排気弁の耐熱性に関わり、参考値として 530 ℃ を 限界とした.
- ⑥ 図示平均有効圧力変動率(IMEP COV: Indicated Mean Effective Pressure Coefficient of Variance)限界: サイクル 毎にピストンが発生する出力の変動を示し、出力の不安定性の指標となる.経験的な観点から、IMEP COV 2.5%を限界とした。

⑦ ノッキング発生限界:4.1.1 節で記す代表ノッキング強度(KI)が0でない数値となった場合、すなわち軽微なノッキングが観測された場合を限界とした.

ここで、本試験において、給気マニホールド温度は37 ℃ 一定、副室燃料流量割合は2.5 %一定とした.また、 空気過剰率は給気マニホールド圧力を制御することにより調整すると共に、給気温度はインタークーラの冷却水 流量を制御して調整した.

3.2 試験結果

図4(a), (b), (c)に, リーンバーンガス機関の3種の運転条件(機関出力と回転速度)に対する試験結果を示す. 同図中の×印は,試験時の制御パラメータ(空気過剰率と点火時期)であり,各線は,上述した各機関特性限界 を示す.つまり,図中の各機関特性限界線で囲まれた(色塗りされた)領域は,適切な制御パラメータの範囲を 示し,各機関特性限界線より外周側領域は不適切な制御パラメータとなる.なお,運転条件における機関出力は, 軸平均有効圧力で示した.

図4(a)に示す軸平均有効圧力(BMEP)1.25 MPa,機関回転速度1800 min⁻¹の運転条件(機関出力約380kW相当) では、空気過剰率を希薄側(増大)、点火時期を遅角側に設定すると、発電効率、THC 排出率、IMEP COV が限 界となることがわかる.これらの3つの限界は、空気過剰率の増大に伴い、予混合気が希薄可燃限界に近づき、 燃焼が不安定化したことが要因であると考えられる.この不安定燃焼は、予混合気の燃焼条件が希薄可燃限界に 近づき、燃焼過程において予混合火炎が部分的に弱体化し不安定燃焼となることによって、未燃炭化水素である THC が増大し、未燃燃料のエネルギー損失分の発電効率が低下し、サイクル毎の熱発生量の変動から IMEP COV が増大したと考えられる.つまり、空気過剰率を増大し点火時期を遅角した制御パラメータに設定すると、大量 の未燃燃料を排出すると共に燃焼変動が過大となり、機関回転速度にハンチングが発生し、最終的には安定した 運転の継続が困難になる可能性が高くなる.

一方,空気過剰率を過濃側(低下),点火時期を進角側に設定すると,NOx 排出率が限界に近づく.この空気 過剰率の低下は断熱火炎温度を高め,点火時期の進角は筒内圧力を高めることから,筒内燃焼ガス温度を上昇さ せサーマル NOx 生成速度が増加したと考えられる.つまり,空気過剰率を低下し点火時期を進角した制御パラ メータに設定すると,発電効率および燃焼安定性は向上するが,NOx 発生量が増加する可能性が高くなる.

また,同図中のPmax限界線が点火時期の進角に対して急激に増加することから,Pmax限界の支配的要素は点 火時期であり,空気過剰率の影響は少ないことがわかる.つまり,最大筒内焼圧力は,点火時期の調整によって 制御可能である.

一方, 排気温度限界線は, 空気過剰率の低下および点火時期の遅角によって現れることがわかる. この現象は, 空気過剰率が低下することによって断熱火炎温度が上昇し, 点火時期が遅角することによって図示効率が低下す るため, より多くの熱エネルギーが排気に流出し, 結果的に排気温度が上昇したと考えられる.

なお、本運転条件にけるすべての制御パラメータにおいて、ノッキングの発生は確認できなかった.

図 4(b)に示す軸平均有効圧力(BMEP)1.25 MPa,機関回転速度 1500 min⁻¹の運転条件は、図 4(a)の運転条件に対して機関回転速度を低下させた条件となっている.制御パラメータの変化に対して、各機関特性限界の現れる傾向は図 4(a)と変わらないが、その各機関特性限界線で囲まれた領域は、点火時期の遅角側に移動していることが確認できる.つまり、本機関の運転において軸平均有効圧力(BMEP)一定で機関回転速度が低下する場合は、点火時期を遅角または空気過剰率を増大することによって、安定した運転を継続することが可能となると考えられる.

なお、本運転条件では、空気過剰率の低下および点火時期の進角により、軽微なノッキングの発生が確認でき、 ノッキング発生領域に入る制御パラメータでの条件下ではピストンへの熱負荷の増大による焼損が懸念される.

図 4(c)に示す軸平均有効圧力(BMEP)0.65 MPaG,機関回転速度 1800 min⁻¹の運転条件は、図 4(a)の条件に対して 軸平均有効圧力 (BMEP)を約半分に低下させた条件となっている.制御パラメータの変化に対して,発電効率, THC 排出率, IMEP COV および NOx 排出率の限界は、図 4(a)と比較して空気過剰率の過濃側および点火時期の 進角側に移動していることが確認できる.つまり,本機関の運転において回転速度一定で軸平均有効圧力(BMEP) が低下する場合は、点火時期を進角または空気過剰率を低下することによって、安定した運転を継続することが 可能となると考えられる.一方,軸平均有効圧力(BMEP)の低下に伴う燃料供給量および空気供給量が低下したこ とから、筒内圧力が低下し、Pmax 特性線は同図中から消失している.



図4 ガス機関の適正運転条件

3.3まとめ

本検討では、リーンバーンガス機関における3種の運転条件(機関出力と回転速度)に対して、空気過剰率と 点火時期の適正範囲を調査した.この結果、空気過剰率を増大し点火時期を遅角する場合、燃焼不安定性を示す 発電効率限界、THC 排出率、IMEP COV に上記設定限界が現れ、この燃焼不安定化と対角の運転条件に NOx 排 出率の限界が現れることを確認した.また、一般的に、最大筒内焼圧力限界(Pmax 限界)は、点火時期が支配 的要素であることを確認した.本ガス機関の機関適正において、軸平均有効圧力(BMEP)一定で機関回転速度が低 下した場合は、空気過剰率を希薄側および点火時期を遅角側に制御し、機関回転速度一定で軸平均有効圧力 (BMEP)が低下した場合は、空気過剰率を過濃側および点火時期を進角側に制御することにより、本ガス機関の安 定した運転が可能になると考えられる.

本試験により、導入したリーンバーンガス機関の各運転条件に対して、機関特性と適切な制御パラメータが変 化する要因と特徴が明らかになり、ガス機関の高効率化を目指した EGR 技術や水噴射技術、または、ガス機関 からの二酸化炭素排出量削減を目指した水素またはバイオガス混焼技術を本ガス機関に適用した場合の適正制御 パラメータに対する有効な知見が得られたと考える.

4. ガス燃料組成の相違がリーンバーンガス機関の性能に与える影響

天然ガスを燃料とするガス機関の機関特性(燃焼・排気特性等)は供給する燃料ガス組成の影響を受けること が知られている⁵⁾.陸上発電用ガス機関では、パイプラインから供給される安定した燃料ガス組成を対象にして 安定した機関性能が得られるように各種設定が行われている。しかしながら、ガス機関を船舶へ搭載する場合、 供給される燃料ガスの組成は、以下の要因によって異なると言われている(図5参照)⁵.

(1)産出地(バンカリング地毎の燃料組成)

(2)天然ガス種(在来型,非在来型)

(3)船内燃料貯蔵法(液化貯蔵·圧縮貯蔵)

また、燃料貯蔵法として液化天然ガス(LNG: Liquefied Natural Gas)を用いる場合には、ガス機関に供給する際の 燃料ガス組成が以下の要因により変動することも知られている 6.7).

(4)ボイルオフに伴う重質炭化水素の濃縮(ウェザリング現象)

(5)気化ガスとボイルオフガスの混合比率

(6)タンク内部の分離・層状化(メタン等の軽質炭化水が上部へ、ブタン等の重質炭化水素濃度が下部へ移動)







シェールガス or 在来ガス



図5 燃料ガス組成の相違の要因

(7)気化器や配管内部での滞留

さらに、ガス機関の更なる CO₂排出量削減のため、燃料ガスに水素を混入することが欧州を中心に検討されて おり、将来的に下記要因についても配慮する必要がある⁸⁾.

(8)水素混合(燃料ガスへの水素混合の有無・比率)

以上のことから,舶用ガス機関は、燃料ガス組成が変化した場合においてもその信頼性・安定性・環境適合性を 担保することが求められている.

これまでに、燃料ガス組成の相違がガス機関の機関特性に与える影響は、自動車用等の小型ガス機関において いくつか報告されている^{9~11}.一方、舶用の比較的大型(数百kW以上)のガス機関に対しては、燃料ガス組成 が機関特性に与える影響を調査した報告例は少ない.また、異常燃焼の一つであるノッキングの発生特性は燃料 ガスの組成に強く影響を受けることが知られており、自動車用のガソリン燃料では、オクタン価(ON: Octane Number)と呼ばれる指標によって燃料の耐ノック性が評価されるが、ガス燃料ではメタン価(MN: Methane Number)が世界標準的に用いられている.一方、このメタン価は自動車用機関を対象とした機関諸元や運転条件 で定められた指標であるため、近年開発されている舶用リーンバーンガス機関の燃焼条件と大きく異なり、特に 空気過剰率や平均有効圧力の相違は、燃焼に対して大きな影響があるため、舶用ガス機関の燃焼条件における既 存メタン価の有効性を検証する必要がある.そこで、本章では、2章で紹介した400 kW リーンバーンガス機関 を用いて、供給する燃料ガスの組成を変化させた場合の燃焼特性や排気特性等を実験的に調査した結果と共に、 ノッキング強度とメタン価の関係性について検証した結果を報告する.

4.1 実験方法·条件

本実験において、ガス機関へ供給する燃料ガス組成は、図3に示した燃料組成変更装置を用いて、都市ガス(13A) に対して、プロパン主成分液化石油ガス(LPG: Liquefied Petroleum Gas)およびブタン主成分LPG(以下、P-LPG お よび B-LPG と記す)の2種類のLPGと純水素(H₂)を混合することにより変化させた.また、ガスクロマトグラ フ(Agilent Tech. 490 Micro GC)を用いてガス機関へ供給する燃料ガス組成中のH₂およびアルカン系低級炭化水素 (メタン(CH₄)、プロパン(C₃H₈)、n-ブタン(n-C₄H₁₀)、iso-ブタン(iso-C₄H₁₀))の濃度を分析することにより、その 物性値を計算した.

表2にガス機関に供給した都市ガス,P-LPG,B-LPG,H₂の組成と代表的な物性値および燃料評価指数(低位 発熱量(LHV: Lower Heating Value), ウォッベ指数(WI: Wobble Index)¹²⁾, MWM 法によって算出されたメタン価(MN: Methane Number)¹³⁾, MCP: Maximum Combustion Potential¹²⁾)を示す.なお,WI は高位発熱量(HHV: Higher Heating Value)を空気に対する比重の平方根で除したものであり,ガス噴射・調整機器の噴出熱量を示す.MN は燃料ガス の耐ノッキング性の評価指数であり,異常燃焼を管理するための指標である.MCP は燃焼速度の指標であり,ガ ス燃焼器における火炎リフトや逆火の特性を管理するために用いられる.

	都市ガス	P-LPG	B-LPG	${ m H}_2$	
CH_4	89.7	0.0	0.0	0.0	
C_2H_6	5.5	1.0	0.2	0.0	
C_3H_8	3.7	98.0	26.7	0.0	Vol.%
$n-C_4H_{10}$	0.5	0.2	38.8	0.0	
$iso-C_4H_{10}$	0.5	0.8	34.4	0.0	
H_2	0.0	0.0	0.0	100.0	
低位発熱量 LHV	40.3	91.2	111.1	12.3	MJ/Nm ³
ウォッベ指数 WI	55.9	80.1	87.7	48.4	MJ/Nm ³
メタン価 MN	69.3	33.5	16.2	0.0	-
最大燃燒速度 MCP	37.0	41.0	38.7	238.0	-

表2 実験に使用した燃料組成と性状

表3にガス機関運転条件を示す.本実験では、P-LPG、B-LPGおよび水素供給設備のガス供給量の制限に対してより大きい混合率で実験を実施するため、本ガス機関の定格運転条件を基準となる都市ガスの燃料消費量が少ない320 kW/1500 min⁻¹とした.さらに、各種パラメータ(空気過剰率(λ)および点火時期)は、舶用機関のNOx3

次規制値を参考にして十分低くなるように設定した.なお、本研究では、ガス燃料組成の相違がリーンバーンガ ス機関の機関特性に与える影響を調査することを主目的としたため、点火時期・空気過剰率・給気温度を一定と し、都市ガス(13A)に対して P-LPG、B-LPG または水素の体積混合率を変化させた.

なお、ノッキング特性を評価する試験では、筒内圧力センサを取り付けている第6気筒の点火時期のみを進角 することで、第6気筒以外の気筒でノッキングが発生しないようにすることで、安全に試験が実施できるよう配 慮した.

衣 シー 天殿木件							
		燃焼特性 排気特性	ノッキング特性				
回転	速度	$1500 \mathrm{~min^{-1}}$					
発電	電出力	320 kWe					
軸平均	有劾圧力	1.35 MPa					
空気過剰率		1.85					
占心時期	Cyl. 1-5	-10 5 °ATDC	-8 °ATDC				
尽八时旁	Cyl.6	-10.5 AIDC	-15 °ATDC				
副室流量割合		2.5 %					
給気温度		38 °C	50 °C				

中睑久丛

4.1.1 ノッキング強度算出法

ノッキングとは、点火後の火炎伝播に伴う圧力上昇によってシリンダ内部の未燃混合気が断熱的に圧縮され高温 化することにより自着火に至り、この熱発生による急激な圧力の上昇によって気筒内部に圧力振動が発生する現 象である.ガス機関における強いノッキングは、燃焼室壁面の過熱による焼損の危険があり、運用上、特に注意 を要する現象である^{14,15)}.

図 6(a)に、本ガス機関におけるノッキング発生の一例として、ノッキング未発生時と発生時の燃焼圧力波形と その周波数解析結果を示す. ノッキングが発生すると最大筒内圧力以後で振動が見られ、この振動は機関特有の 周波数(ノッキング周波数)を有することが知られている¹⁴⁾.本ガス機関のノッキング周波数は,図 6(b)の周波 数解析結果から 3~5 kHz 付近であることがわかる.本研究ではノッキングに起因しない圧力振動が 4-6 kHz に観 測されたため、この影響を除外するため 3~4 kHz をノッキング周波数として解析を行った.

一般に,機関のノッキング発生特性を評価するには、ノッキングの強さを表すノッキング強度 KI(Knock Intensity)を適切に評価する必要があり、いくつかの算出方法が用いられている¹⁶.いずれの手法も基本的にはノッ キング周波数の圧力振動の強さを数値化するものである.代表的にはノッキング圧力振動に対して、絶対値に対 する積分を取る手法, peak to peak を取る手法, FFT 解析結果の最大値を取る手法などがある.本研究では絶対値 に対する積分値を取る手法を採用した.以下に算出法の詳細を述べる.

本研究では、まず、計測した筒内圧力波形に対して、周波数通過帯域が本ガス機関のノッキング周波数である 3-4 kHz のバンドパスフィルタを掛けることによってノッキング圧力波形を抽出した.次に、この波形の絶対値に 対する積分値を積分時間で除した値をノッキング圧力波形の振動強度とし、この振動強度を以下の式から1サイ クル毎の瞬時 KI と定めた.

$$KI_{inst,j} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left| P_{filt,3-4kHz,j} \right| dt$$

ここで、T はノッキング圧力波形の積分時間、P_{fll,3-4kH}は筒内圧力に対して周波数通過帯域 3-4 kHz のバンドパスフィルタを掛けたノッキング圧力波形を示している.図7に通常運転状態(ノッキング未発生条件)とノッキング発生条件における 300 サイクル分の瞬時ノッキング強度の頻度分布を示す.同図において、ノッキング未発 生条件においても 35kPa 以下に分布が見られるが、この圧力振動はノッキングに起因するものではなく、正常燃焼に起因する圧力振動と考えられるため、本研究では瞬時 KI が 35 kPa 以上の場合をノッキング発生サイクルと 判別した.取得した 300 サイクル内でノッキング判別(瞬時 KI > 35 kPa)されたサイクルを抜き出し、その瞬時 KI を合算しサイクル数で除したものをその運転条件における代表 KI とした.つまり、ここで定義した代表 KI は、300 サイクル内での 35kPa 以上の瞬時 KI の発生頻度を示し、以下の式で算出することができる.



(557)

$$KI = \frac{1}{300} \sum_{j=1}^{300} \left[\left(KI_{inst,j} \right)_{KI_{inst,j} > 35kPa} \right]$$

4.1.2 メタン価算出法

メタン価は、ガス燃料の中で最もノッキングが発生し難いメタンと最もノッキングが発生し易い水素の 混合燃料を正標準燃料として定めたガス燃料の耐ノッキング評価指標である.その算出法の概念は、まず、 評価対象の燃料ガスで CFR (Cooperative Fuel Research)機関を規定条件運転し、その状態で圧縮比を 連続的に高めることによりノッキングを発生させノックキング強度を計測する.この際、圧縮比とノック キング強度の関係が同等である正標準燃料の燃料中メタン体積濃度[%]をメタン価として表している.

M.Leiker らが導出したメタン価算出法 ¹⁷⁾を基に,現在,ガス燃料組成からメタン価を算出する方法が いくつか提案されており,AVL 社製メタン価算出ソフトウエアの"Methane"を用いて算出される AVL 法メタン価や欧州標準化委員会(CEN, Comité Européen de Normalisation)で議論されている MWM 法メタン価がある ¹³⁾.本研究では,その算出法が公開されている MWM 算出法を用いてメタン価を算出し た.

4.2 実験結果

4.2.1 燃焼特性, NOx 排出特性

図 8(a), (b), (c)に都市ガスに対して P-LPG, B-LPG, H₂の体積混合割合を変更した混合ガスをガス機関に供給 した際の各種燃焼波形 (クランク角度に対する筒内圧力波形,熱発生率)を各々示す.同図(a), (b), (c)から, P-LPG および B-LPG の体積混合割合を増加した場合は,筒内圧力波形および熱発生率にほとんど変化が見られないこ とが確認できる.これは希薄燃焼域においてアルカン系炭化水素の燃焼速度の変化が小さいためであると考えら れる¹⁸⁾.一方,同図(c)から,H₂の体積混合割合を増加した場合は,筒内圧力波形において燃焼前期過程の途中 から筒内燃焼圧力が増大し,燃焼後期過程の熱発生率が増大していることがわかる.これはH₂の燃焼速度が速 いことから,燃焼前期過程内の主室内予混合気燃焼と燃焼後期過程の主室伝播火炎が活性化したことが要因と



図 8 P-LPG, B-LPG, H₂の混合が燃焼に与える影響

なっていると考えられる.

次に、図 9(a), (b), (c), (d)に都市ガスに混合する P-LPG, B-LPG, H₂の体積混合割合に対する NOx 排出率, 平均最高筒内燃焼圧力(Pmax), 燃焼期間(シリンダ内の燃料が 20%から 80%まで燃えるのに要するクランク角 度), 図示平均有効圧力変動率(IMEP COV)の関係を各々示す. IMEP COV は図示平均有効圧力の標準偏差を平 均値の平均値で除した値であり,サイクル毎の燃焼不安定性の指標である. 同図(a)および同図(b)から, P-LPG, B-LPG, H₂の体積混合割合の増加に伴いNOx 排出率, Pmax ともに増大する. また,同図(c)から P-LPG, B-LPG, H₂の体積混合割合の増加に伴い燃焼期間が短縮している. この NOx 排出率および Pmax の増大は,燃焼期間の 短縮により,点火時期が進角した場合と同様の効果が現れためであると考えられる. ここで, P-LPG および B-LPG の体積混合割合を 20 Vol.%とした場合には,燃焼期間が約 1.0 deg.程度短縮し, H₂の体積混合割合を 20 Vol.%とした場合には燃焼機関が約 2.0 deg.程度短縮することが確認できる. 一方,同図(d)から燃焼の安定性を 示す IMEP COV は, P-LPG, B-LPG, H₂を混合した場合にもほとんど変化が無く,この混合割合の範囲では燃 焼が安定していると考えられる.

以上の結果から、P-LPG、B-LPG、H₂混合時の NOx 排出率および Pmax を抑制するためには、点火時期の 遅角などの制御が有効であると考えられる(3章参照).一方、P-LPG や B-LPG 混合による燃料組成の変化は、 ガス機関の NOx 排出率や Pmax 等の燃焼特性に与える影響が小さいことが確認できた.



図 9 P-LPG, B-LPG, H₂の混合が機関特性に与える影響

4.2.2 ノッキング発生特性とメタン価の有効性検証

図 10(a)に都市ガスに混合する P-LPG, B-LPG, H₂の体積混合割合とノッキング強度(KI)の関係を示す. 同図から P-LPG, B-LPG, H₂の体積混合割合の増加はいずれもノッキング強度(KI)を増加させ、ノッ キング(瞬時ノッキング強度 KI_{inst} > 35 kPa)を発生させることがわかる.またノッキング強度(KI)の体 積混合割合に対する増大傾向は混合する燃料種によって異なり、ノッキングを起こしやすい順に B-LPG, P-LPG, H₂となる.次に図 10(b)にノッキング強度(KI)と発熱量混合割合の関係を示す.図 10(a)と比 較すると、H₂混合時のノッキング強度(KI)が B-LPGと P-LPG 混合時の間に入っていることが確認で きる.これは、H₂の体積辺りの発熱量が低いことに起因する.図 10(c)にメタン価(MN)とノッキング強度 (KI)の関係を示す.同図から P-LPG, B-LPG, H₂のいずれの燃料を混合した場合でもメタン価(MN) とノッキング強度(KI)の関係性は概ね同一曲線上にあることがわかる.メタン価(MN)は、主に自動 車用ガス機関の燃焼条件で定められたガス燃料の耐ノッキング性指標であるが、自動車用の燃焼条件と大



きく異なる舶用リーンバーンガス機関に対しても耐ノッキングの性評価指数として有用であると考えられる.

図 10 P-LPG, B-LPG, H₂の混合がノッキング発生に与える影響

4.2.3 ノッキング発生特性の給気温度の影響

図 11 に給気温度 14,38,50 ℃ で P-LPG,B-LPG,H₂を混合した場合のメタン価(MN)とノッキング強度(KI)の関係を示す.給気温度が高まるとノッキングの発生するメタン価がより高くなり,ノッキングが発生し易くなっていることがわかる.前述したように,ノッキングはシリンダ内で予混合火炎が伝播する過程で未



燃予混合気が断熱的に圧縮され温度が高まり自着火することで生じる.このため,給気温度が上昇すると未燃予 混合気の温度が上昇し,より耐ノッキング性の高い(メタン価が高い)燃料でもノッキングが発生し易くなった と考えられる.つまり,メタン価とノッキング強度の関係は給気温度に依存し,給気温度が上昇すると高いメタ ン価でもノッキングを発生する可能性がある.本実験条件においては,給気温度が12~14 ℃上昇すると、メタ ン価が 8~10 高い場合でも同等のノッキングが発生する結果となった.本実験の結果から,メタン価とノッキン グ強度(KI)の関係性を環境条件を変更して調査することにより,ガス機関の環境・運転条件と使用できる燃料の メタン価の限界を評価することが可能になると考えられる.

4.3 まとめ

本研究では、400 kW リーンバーンガス機関を用いて、供給する燃料ガス組成を P-LPG、B-LPG、H₂を都市ガスに混合させた場合の燃焼特性や排気特性等を実験的に調査した.この結果、都市ガスに対する P-LPG、B-LPG、H₂の体積混合割合の増加に伴い、NOx 排出率および最大筒内圧力(Pmax)が増大することを確認した.これらの増大は、P-LPG、B-LPG、H₂の混合によって燃焼期間が短縮したためであると考えられる.

また,主に自動車用ガス機関の燃焼条件で定められたガス燃料の耐ノッキング性指標であるメタン価 (MN)は,舶用リーンバーンガス機関に対しても耐ノッキングの性評価指数として有用であることが確認された.さらに,メタン価とノッキング強度の関係は,ガス機関の吸気温度に依存することを確認した.

本研究結果では、ガス機関に供給する燃料ガス組成や吸気温度がメタン価とノッキング強度の関係が明らか になり、今後、ガス機関搭載船舶において、燃料ガス組成や吸気温度が変化する場合にガス機関の制御パラメー タを制御する上で有益な知見が得られたと考える.

5. あとがき

本研究では、高い環境適合性を有する舶用リーンバーンガス機関の安定性、信頼性を維持しつつ、更なる熱効率向上や環境負荷物質排出削減を目指し、排気再循環(EGR: Exhaust Gas Recirculation)技術および水噴射技術の研究や、水素やバイオガス等を混焼利用する技術の研究を進めている.これらの技術を適用するためには、実機リーンバーンガス機関の燃焼・排気特性等の機関特性を把握し、適用技術を効果的に利用するための機関制御パラメータの制御が不可欠となる.そこで、本稿では、これまで進めてきた研究結果として、当初所有の400kWリーンバーンガス機関の運転条件に対する機関特性と制御パラメータの関係を明らかにした結果を紹介した.また、供給する燃料ガスの性状が変化した場合の機関特性、特にノッキング発生特性を調査し、既存のメタン価によるノッキング強度評価が可能であることを検証した結果を報告した.本研究結果を踏まえて、舶用リーンバーンガス機関の更なる熱効率向上や環境負荷物質排出削減を目指した技術開発を進めていきたいと考えている.

謝 辞

本稿では、第3期中期計画期間(平成23~27年度)に実施した研究課題「マリンハイブリッドシステムの開発 に関する研究」および「舶用ガス機関の異常燃焼の抑制・制御に関する研究」の研究成果の一部を紹介した.また、 本稿の一部は、JSPS 科研費 26820386 の助成を受けた.ここに記して関係各位に謝意を表します.

参考文献

1) 海事レポート 2017~人と技、たくましい「海」へ~第6章クリーンな海の確保,国土交通省海事局 (2017), pp.72-81.

- 2) 荒木康伸, エネルギー効率設計指標(EEDI)規制と対応技術動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 52巻, 4号(2017), pp.83-87.
- 3) 市川泰久ら他1名,燃料ガス組成がリーンバーンガス機関の燃焼特性および排ガス特性に与える影響,日本 マリンエンジニアリング学会誌,52巻2号(2017), pp.99-106.
- 日本規格協会, JIS B 8008-1 附属書A(規定)排気質量流量および/又は燃焼空気質量流量の計算,(平 21), 72-88.
- 5) 安枝信次,ガス燃料の品質と規格化の必要性,日内連主催講演会(2015).
- 6) 宇井岳夫,ガス燃料船とガス供給船の実現への課題,日本マリンエンジニアリング学会学術講演会第83回講 演論文集(2013), pp.205-208.
- 7) 後藤悟,多様化する舶用燃料と対応・機関側の対応(中速機関),日内連主催講演会(2015),27.
- 8) Melaina, M. W. et.al, NREL Technical Report, NREL/TP-5600-51995(2013).
- 9) 片岡克己 ら他3名, 定容燃焼器を用いた天然ガスエンジンの燃焼特性に関する基礎的実験, 日本機械学論文 集(B編) (2013), pp.358-363.
- 石山拓二 ら他3名,希薄燃焼火花点火機関における排気特性への燃料影響,日本機械学会論文集(B編),66 巻 645 号(2000), pp.288-294.
- 11) B.H.Min ら他3名, Effects of gas composition on the performance and emissions of compressed natural gas engines, KSME International Journal, 16-2(2002), pp.219-226.
- 12) 日本機械学会編, 燃焼工学ハンドブック, 日本機械学会
- CEN, "Gas Infrastructure Quality of Gas Group H, European Committee for Standardization Final Draft, FprEN 16726 (2015).
- 14) Heywood, J. E., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, (1988), 567–596.
- 15) 後藤悟 ら他1名,高出力希薄燃焼ガスエンジンの開発(ノッキングに関する実験的考察),日本機械学会論 文集(B編),63巻607号(1997)
- 16) F. Millo ら他2名, Knock in dual fuel engines: a comparison between different techniques for detection and control, CIMAC Congress 2010, Paper No.:212(2010).
- 17) M.Leiker ら他4名, Evaluation of anti-knocking property of gaseous fuels by means of methane number and this practical application to gas engine. ASME, 72-DGP-4 (1972), pp.1-14.
- 18) S. G. Davis ら他1名, Determination of and fuel structure effects on laminar flame speeds of C1 to C8 hydrocarbons, Combustion Science and Technology, 140-1(1998), pp.427-449.