

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820386

研究課題名(和文) 船用ガス機関におけるガス燃料の耐ノッキング性評価指数に関する研究

研究課題名(英文) A Study of gas fuel anti-knock index of marin lean burn gas engine.

研究代表者

市川 泰久 (Ichikawa, Yasuhisa)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20586680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では既存の燃料耐ノッキング評価指数(燃料のノッキングのし難さの指標)であるメタン価の船用リーンバーンガス機関における有効性を実機実験によって検証した。ここで、ノッキングとは異常燃焼の一種でエンジンを損傷する危険のある現象である。実験では定格発電出力400kWのガス機関に供給される都市ガスに対してプロパン主成分LPGとブタン主成分LPGと純水素を混合して燃料ガス組成を変更し、シリンダ内圧力計測結果からノッキング強度特性を測定した。この結果、メタン価を定めるためのエンジン試験条件と大きくことなる燃焼条件で運転される船用リーンバーンガス機関においても既存のメタン価の有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The present study has confirmed the efficacy of the Methane Number(MN) by way of experiment used a marine lean burn gas engine with pre-chamber. The experiments was carried out using the lean burn gas engine, which has the rated power output of 400 kW with spark ignition pre-chamber system. The various compositions of the base fuel gas (Japan city gas) changed by supplying propane-based LPG (liquefied petroleum gas), butane-based LPG and hydrogen. The conclusions are MN can be an indicator to quantify the knock resistance of fuel gas on actual lean burn gas engine.

研究分野：熱機関

キーワード：船用ガス機関 燃料組成 メタン価 ノッキング

1. 研究開始当初の背景

国際海事機関では船舶からの有害排出物に関する規制を進めており、窒素酸化物 (NOx) や硫黄酸化物 (SOx)、粒子状物質 (PM) に対する規制を年々強化している。このような排出ガス規制は従来の船用ディーゼル機関だけで対処することが困難であるため排気ガス後処理設備を必要とし、船用ディーゼルプラント全体のコスト上昇が懸念されている。このため、排気ガス後処理設備なしに NOx、SOx、PM を規制値以下にすることが可能な船用天然ガス燃料機関が近年注目されている。

現在、開発が進められている高速および中速の船用ガス機関の多くは、既存の陸用ガス発電機関の技術を転用したものであり、副室やパイロット噴射などの高エネルギー着火技術を用いた超希薄予混合燃焼方式 (自動車用ガス機関に採用される量論混合比単室火花点火機関とは異なる) を採用している。この船用ガス機関は、過給圧、圧縮比、平均有効圧力の上昇、希薄化、高膨張比化等の改良技術が進展し、現在ではディーゼル機関に匹敵する熱効率を有しており、従来の船用ディーゼル機関の代替として期待されている。一方、予混合燃焼方式であるガス機関は、ノッキングや失火といった異常燃焼に課題があり、重度のノッキングが発生すると熱負荷が上昇し機関を焼損させる危険性がある。このため、ノッキングを起こさないガス機関の適切な運用技術の開発が求められている。そこで、本研究では、船用ガス機関のノッキングに対する安全性を確保するため、ガス燃料の耐ノッキング性を適切に評価する手法を提案する。

一般的にガス機関におけるガス燃料の耐ノッキング性評価にはメタン価が用いられている。このメタン価はガソリン燃料のオクタン価に対応した指標であり、試験装置、方法、条件は国際規格の ASTM D 2700 に定められるモータ法オクタン価の評価方法に準拠している。現在、自動車業界では世界燃料憲章 (WWFC: Worldwide Fuel Charter) において圧縮天然ガス燃料規格を協議しており、ガス燃料の耐ノッキング性の評価にメタン価を採用し燃料品質を管理することを検討している。これに伴い、船舶業界でも今後メタン価を用いたガス燃料品質管理の規格策定の検討が進められることが予想されるが、船用ガス機関の実用運転条件とメタン価を定める燃料性状試験専用エンジン (CFR エンジン) の試験運転条件は大きく異なる。表 1 に、CFR エンジンと現在開発が進められている船用ガス機関の代表的な諸元、運転条件の違いを示す。このように CFR エンジンと船用ガス機関とでは着火方法や空気過剰率に大きな違いがあり、船用ガス機関に既存のメタン価による耐ノッキング性評価をそのまま適用することは不適切であり、船用ガス機関に適切な耐ノッキング性評価指数を確立する必要がある。

表1 メタン価試験用機関と船用リーンバーンガス機関の諸元・運転条件の比較

用途	メタン価試験機 4st	船用推進機関 4st
エンジン	Waukesha CFRエンジン	WÄRTSILÄ 50DF
エンジン形式	単室火花点火	パイロット着火
空気過剰率	1	2付近
点火時期	15° BTDC	-
正味平均有効圧力	-	2.0 MPa
ピストン行程	114.3 mm	580 mm
シリンダ直径	82.55 mm	500 mm
圧縮比	4~18で可変	12
回転数	900 ± 9 rpm	500 rpm

2. 研究の目的

本研究課題では、船用ガス機関に対して、既存のメタン価によるガス燃料の耐ノッキング性の評価を実験的に検証すると共に、船用ガス燃料を対象とした適切な耐ノッキング性評価方法を確立することを目指す。まず始めに、当研究所が所有する陸用ガス発電機関を用いて、都市ガスに対してプロパン、n-ブタン、iso-ブタン、水素の割合を調整し、メタン価を変更したガス機関燃焼実験を実施し、既存の手法で算出したメタン価と筒内圧力の計測から求めたノッキング強度 (KI: Knocking Index) の関係を調査する。この結果をもとにガス機関におけるメタン価評価の有効な適用範囲や条件を求める。次に、船用ガス機関の運転条件を模擬し、ガス発電機関の点火時期、空気過剰率等を変更した場合についても同様の実験を実施する。以上の実験結果から、運転条件の違いによるメタン価評価の有効な適用範囲および条件を明確化するとともに、船用ガス燃料の新たな耐ノッキング性の評価手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 実験・計測システム

表 2 に本実験で用いたリーンバーンガス機関の諸元、図 1 に実験・計測システムの概要、図 2 に燃料・空気の供給系統および筒内圧力計測の概要を各々示す。

本実験では、図 1 に示すように、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、ガス機関へ供給する燃料ガス組成を変化させた。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の濃度を分析することにより、MN を計算した。本実験において、ノッキング強度を正確に評価するため、図 2 に示すように、ガス機関クランク軸端にロータリエンコーダを取り付けると共に、吸排気ポートおよび第 6 気筒の筒内にピエゾ式燃焼圧力センサ (kistler 製 6041B) を設置した。吸排気ポート圧力センサ信号は、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. として取得した。また、筒内圧力センサ信号は、サンプリング周期をクランク角度の燃焼上死点後 (ATDC: After Top Dead Center) $-60 \sim +90$ deg. の期間とし、時間分解能を $4.1 \mu\text{sec.}$ (角度分解能約 0.036 deg., サンプル数 4096 点) として取得した。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で、サンプリング時間に対応するクランク角度を算出した。表 4 に実験パラメータを示す。本実験パラメータでは、船用機関の NOx 排出規制に近い値になるように各種パラメータを設定した。なお筒内圧力を計測していない気筒に強いノッキングが発生すると実験機関を損傷する可能性がある。この危険を回避するため計測対象の気筒以外がノッキングしないように第 6 気筒のみの点火時期を早めた条件とした。この際、給気温度はインタークーラの冷却水流量を変化させて調整した。また、吸排気流量は、排ガス組成 (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , THC) 分析、燃料流量計測、燃料組成分析結果から炭素バランス法を用いて推定し、空気過剰率は、これらを基に解析することによりリアルタイムに調整を行った。

(2) ノッキング強度 (KI) の算出方法

燃料組成の相違に伴うノッキング発生特性を比較・検討するためには、ノッキングの強さを表す KI (Knock Intensity) 値を正確に評価する必要がある。優れたノッキング強度の指標は、焼損防止の観点から燃焼室壁面温度上昇に対して良い相関があることが重要である。しかし、燃焼室壁面温度の測定には、ガス機関に対する特別な改良が必要なため今後の課題とする。代表的な KI 値には、いくつかの算出方法があるが、何れの算出方法もノッキング時の特有の筒内圧力振動の周波数帯域の振動の強さを表す。本研究における KI 値の算出方法を図 3 に示す。まず、筒内圧力に対して予備試験で得られた本実験機関のノッキング周波数 $3 \sim 4\text{kHz}$ でバンドパスフィルタを掛けた。つづいて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 値とした。さらに 300 サイクル内で瞬時 KI 値 $> 35\text{kPa}$ を抜き出して合算しサイクル数で除したものを KI 値とした。ここで定義した KI 値は、300 サイクル内での 35kPa 以上の瞬時 KI 値の発生頻度を示している。

表2 リーンバーンガス機関の諸元

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
定格発電出力 / 回転速度	400 kW / 1800 min^{-1} (60 Hz) 320 kW / 1500 min^{-1} (50 Hz)

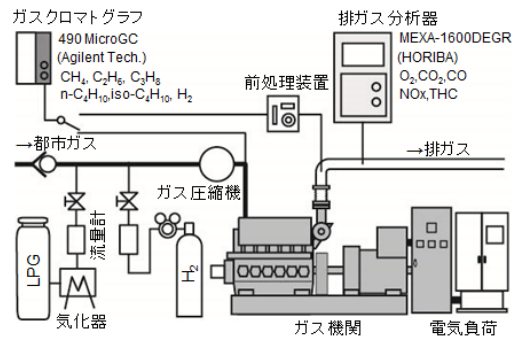


図1 実験・計測システムの概要

表3 各種燃料ガス組成と代表的物性値

	都市ガス	P-LPG	B-LPG	H_2	
CH_4	89.7	0.0	0.0	0.0	Vol. %
C_2H_6	5.5	1.0	0.2	0.0	
C_3H_8	3.7	98.0	26.7	0.0	
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.5	0.2	38.8	0.0	
$iso\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.5	0.8	34.4	0.0	
H_2	0.0	0.0	0.0	100.0	
LHV	40.3	91.2	111.1	12.3	MJ/Nm ³
WI	55.9	80.1	87.7	48.4	MJ/Nm ³
MN	69.3	33.5	16.2	0.0	-
MCP	37.0	41.0	38.7	238.0	-

表4 ガス機関基本運転条件

回転速度	1500 min^{-1}	
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	$38\text{ }^\circ\text{C}$	
副室流量割合	2.5 Vol. %	

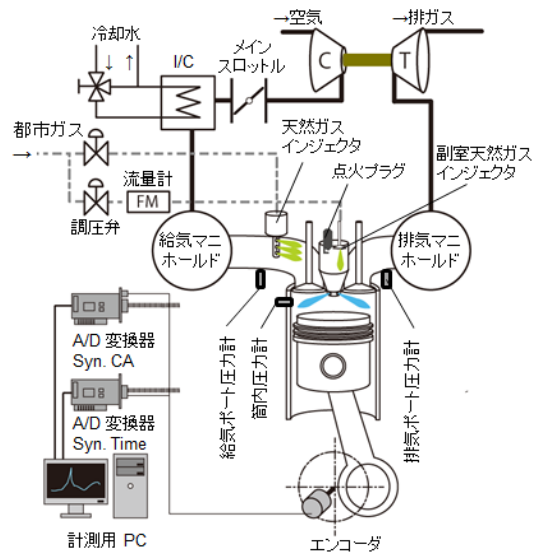


図2 燃料・空気の供給系統及び筒内圧力計測の概要

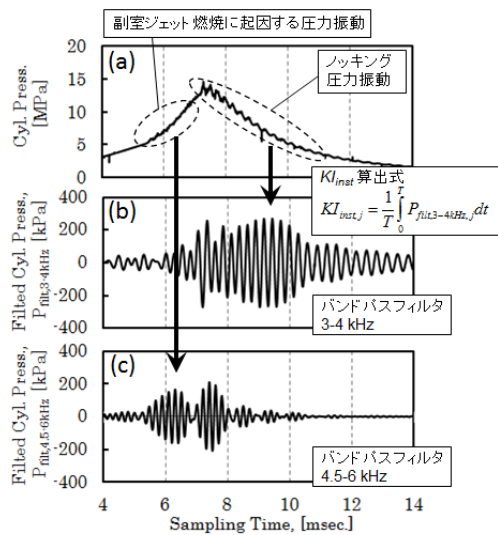


図3 ノッキング強度の算出方法

4. 研究成果

4.1 メタン価の検証

図4に、給気温度を14, 38, 50°Cに変更した場合の、体積混合割合に対するKI値の関係を示す。なお、給気温度以外の条件は表3の基本運転条件である。同図からP-LPG、B-LPGおよびH₂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ることが分かる。また、給気温度を高めると、KI値が増大する体積混合割合が少なくなりノッキングが発生しやすくなる傾向がある。次に、図5に第6気筒のみの点火時期を-15.1, -12.5, -10.1° ATDCに変更した場合の、体積混合割合に対するKI値の関係を示す。なお、第6気筒の点火時期以外の条件は表3の基本運転条件である。同図からP-LPG、B-LPGおよびH₂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強くなることが分かる。また、点火時期を早めると、KI値が増大する体積混合割合が少なくなりノッキングが発生しやすくなる傾向が確認できる。ここで、混合するガス種ごとに同一運転条件で体積混合率とKI値の関係を比較すると、最も少ない体積混合率でノッキング強度が高まるものがB-LPGで、続いてP-LPG、H₂の順になっている。メタン価では標準燃料に、最もノッキングを起こしやすいガス燃料として水素が選定されている、しかし、体積分率で見た場合、低濃度域ではノッキング発生特性に与える影響は水素が最も小さい。またB-LPGを混合した場合は、P-LPGを混合した場合に比べても半分の体積混合率でも同等のノッキング強度となる。よって、天然ガス中のブタンの濃度増加は、顕著にノッキング発生に影響すると言える。

次に、図6に給気温度を14, 38, 50°Cに変更した場合、および図7に第6気筒のみの点火時期を-15.1, -12.5°, -10.1° ATDCに変更した場合のP-LPG、B-LPGおよびH₂を混合した場合のMNに対するKI値の関係を示す。

両図は図4、図5をMNによって再整理したものである。両図から、特定の運転条件に着目すると、MNとKI値の関係は混合するガス種によらず、同様な傾向にあることが分かる。これは燃料ガス組成によらずMNによって燃料のノッキング強度特性が良好に整理できたことを示している。MNが定められているCFRエンジン試験と異なる燃焼条件である副室式リーンバーンガス機関でも、既存のMNはガス燃料の耐ノッキング特性を示す指標として有用であると考えられる。

また、給気温度および点火時期がMNとKI値の関係におよぼす影響に着目すると、38°Cから50°Cに12°C高まると、MNとKIの関係は、MNにして10程度図上左側にシフトする事が分かる。一方、点火時期については、-15.1° ATDCから-12.5° ATDCに2.5°進角するとMNとKIの関係は、MNにして10程度図上左側に

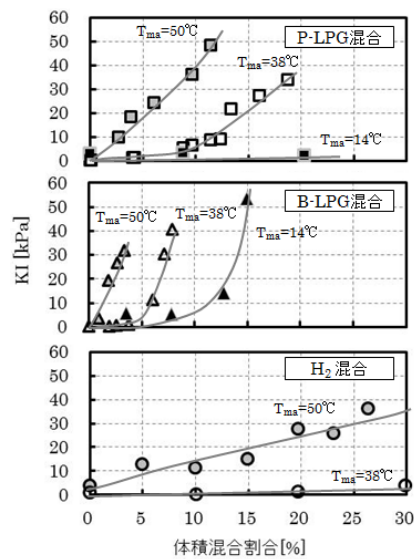


図4 体積混合割合とKI値の関係 (点火時期-15.1° ATDC)

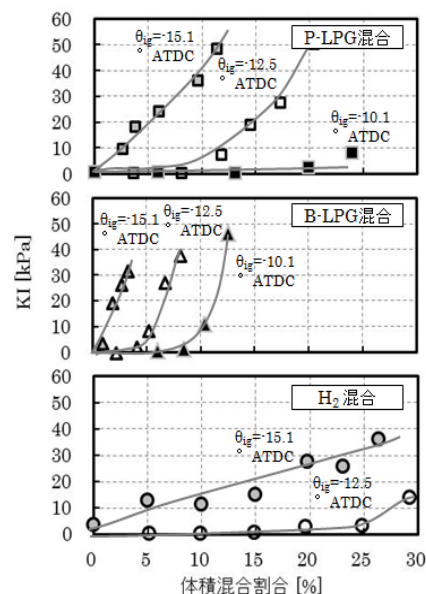


図5 体積混合割合とKI値の関係 (給気温度50°C)

給気温度 T_{ma} [°C]	50	38	14
P-LPG Mixed	□	□	■
B-LPG Mixed	△	△	▲
H2 Mixed	○	○	○

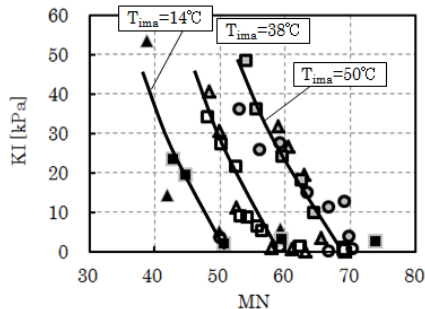


図6 MNとKI値の関係
(点火時期-15.1° ATDC)

点火時期 θ_{ig} [° ATDC]	-15.1	-12.5	-10.1
P-LPG Mixed	□	□	■
B-LPG Mixed	△	△	▲
H2 Mixed	○	○	○

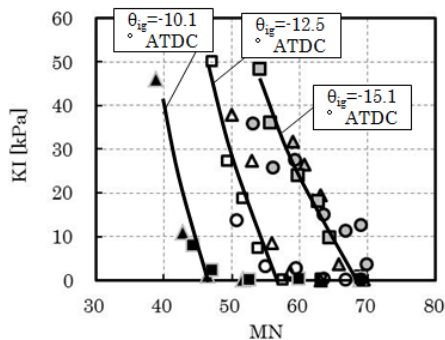


図7 実験・計測システムの概要
(給気温度50°C)

シフトする。このように本運転条件においては、給気温度が12°C高まりノッキングが発生しやすい状況になった場合でも、点火時期を2.5°遅角すると、もとの運転状態に近いノッキング発生特性に調整することが可能であると考えられる。このように、MNを変更する実験は、運転状態変化によるノック発生特性を表す指標としても有用であると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 市川 泰久、関口 秀紀、ボンダレンコ、柳 東勲、平田 宏一、船用リーンバーンガス機関における燃焼ガス組成の相違が燃焼特性および排ガ斯特性、ノッキング発生特性に与える影響、第15回海上技術安全研究所研究発表会、東京都、2015.6.26、234-235。
<https://www.nmri.go.jp/main/publicat>

ions/paper/pdf/2B/15/00/PNM2B150024-00.pdf

- ② 市川 泰久、ボンダレンコ、関口 秀紀、柳 東勲、平田 宏一、リーンバーンガス機関における燃料組成が機関特性に与える影響、第85回日本マリンエンジニアリング学会学術講演会、山口県下関市、2015.10.26-28、191-192。
- ③ Yasuhisa Ichikawa, Hidenori Sekiguchi, Oleksiy Bondarenko, Dong-Hoon Yoo, Koichi Hirata, effects of gas composition on combustion, emission and knocking characteristics of marine lean burn gas engine., 2016 ASME Internal Combustion Engine Fall Technical Conference, 査読有り, South Carolina USA, 2016.10.9-11 (発表予定)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 泰久 (ICHIKAWA Yasuhisa)

国立研究開発法人海上技術安全研究所 その他部局等 研究員

研究者番号: 20586680

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号: