

リーンバーンガス機関におけるブローバイガスの成分分析および 水素混焼時のクランクケース内ガス可燃性評価

中村 真由子*, 市川 泰久*,

Compositional analysis of blowby gas from lean-burn gas engine and evaluation of gas combustibility in crankcase during hydrogen co-combustion

by

NAKAMURA Mayuko and ICHIKAWA Yasuhisa

Abstract

The demand for gas engines that use LNG, a low-carbon fuel, has been increasing as an intermediate step toward the transition to completely decarbonized fuels. The co-combustion of hydrogen with LNG in gas engines is also being investigated as a way to further reduce greenhouse gas (GHG) emissions. However, methane, the main component of LNG, is a much more potent contributor to global warming than CO₂, so it is necessary to prevent the discharge of unburned methane. Methane slip is contained in the exhaust gas as well as in the blowby gas discharged from the crankcase, which cannot be ignored in large marine engines. In this study, we analyzed the composition of blowby gas from a lean-burn gas engine. The blowby gas contained 50% of the premixture gas from the cylinder, 10% of the exhaust gas, a small amount of combustion intermediate products, and most of the rest was air. The premixture gas contained methane, the concentration of which corresponded to 2.2–2.5% of the blowby gas and 1.7–3.2% of methane in the exhaust gas. The composition of the combustible components in the blowby gas indicated that it contained unburned fuel gas. In addition, 0.2–0.3% of the supplied fuel energy was lost in the blowby gas. The energy loss can be recovered by recirculating and re-combusting all of the blowby gas. In this study, we also investigated the hydrogen concentration in the crankcase gas during hydrogen co-firing and methods to reduce the risk of explosion. To ensure safe engine operation during hydrogen co-combustion, the amount of hydrogen in the blowby gas was analyzed at different hydrogen mixing ratios, and the lower limit of flammability was reached at a hydrogen calorific value mixing ratio of 20%. The results show that the hydrogen needs to be ventilated during hydrogen co-combustion in the gas engine.

*環境・動力系

原稿受付 令和4年 1月13日

審査日 令和4年 9月27日

目 次

1. まえがき	30
1.1 研究背景と目的	30
1.2 本研究におけるブローバイガスの定義	31
2. 実験方法	32
2.1 供試機関	32
2.2 計測装置	33
2.3 実験条件	34
2.3.1 ブローバイガス計測	34
2.3.2 ブローバイガス還流実験	34
2.3.3 水素混焼時のブローバイガス計測	34
3. ブローバイガスにおけるメタン排出と対策	34
3.1 ブローバイガスの組成	34
3.2 ブローバイガス排出に伴うメタンスリップ量および損失している燃料成分の熱量	38
3.3 ブローバイガス還流の効果	38
4. 水素混焼時におけるブローバイガスの安全性評価	39
4.1 水素混焼時のブローバイガスの組成	39
4.2 水素混焼時のブローバイガスの可燃範囲試算	40
5. まとめ	41
References	42

1. まえがき

1.1 研究背景と目的

近年、国際海事機関（IMO, International Maritime Organization）はNO_x排出規制、燃料油中の硫黄分規制と船舶に関する規制強化を行ってきた。そして2018年には、国際海運全体から排出される温室効果ガス（GHG, Greenhouse gas）の大幅な削減を目指し、GHG削減戦略を採択した。本戦略の達成には、船用動力システムの燃料を重油からカーボンフリー燃料やカーボンニュートラル燃料に転換することが必要となる。一方、低炭素燃料である天然ガスを燃料とするリーンバーンガス機関は、重油を燃料とするディーゼル機関と比較して大気汚染物質である窒素酸化物（NO_x）や硫黄酸化物（SO_x）、およびGHGである二酸化炭素（CO₂）の排出が少ないため、大気汚染の防止や気候変動の観点から近年需要が高まっている¹⁾。しかし、天然ガスを使用する限りGHG排出ゼロにはなりえない。ガス機関を利用した場合のゼロエミッションの実現には、現状の天然ガス燃料をグリーン水素と回収二酸化炭素から合成されるグリーンメタンに徐々に置換する燃料を変えない道筋と、現状のLNGの利用によるGHG排出削減、カーボンフリー燃料（水素、アンモニア、e-Fuel、バイオガス等）との混焼による削減、カーボンフリー燃料専焼によるゼロエミッションの3段階を経由する燃料を変える道筋があると予想される。本研究では、GHG排出削減に向けた動きの中でそれぞれの道筋における、リーンバーンガス機関からの温暖化係数の高いメタンの放出という課題と、カーボンフリー燃料（水素）との混焼にともなう安全性という課題に着目した。特に、ほとんど注目されることの無かったクランクケース内のガスを対象とし、その実態の把握と技術的課題への対応策の効果を明らかにすることを本研究の目的とした。

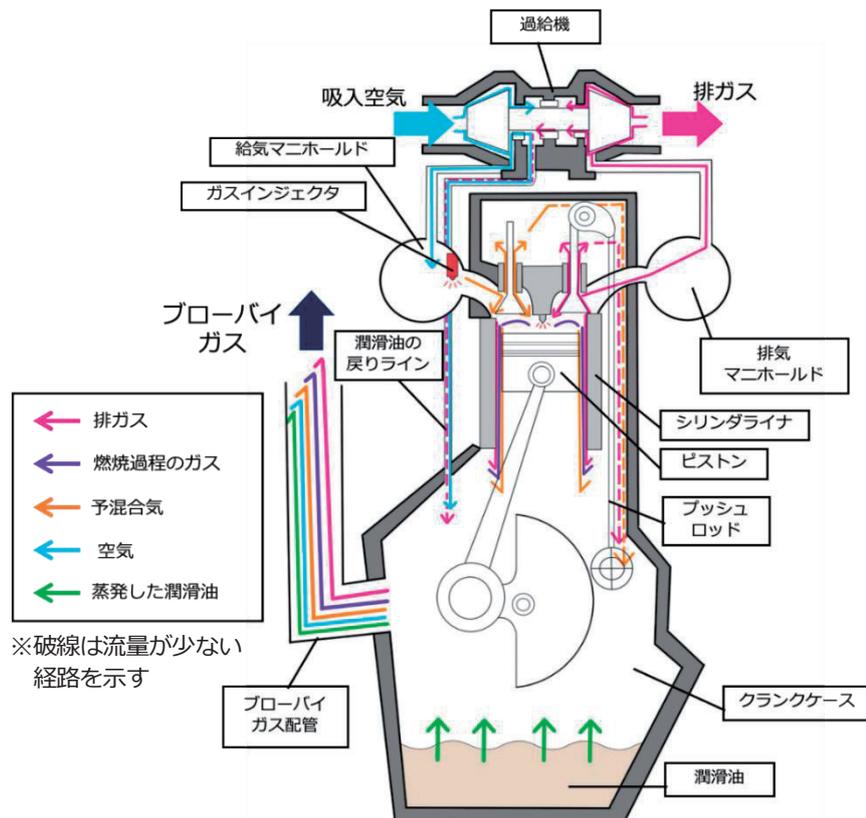
まず、リーンバーンガス機関は予混合燃焼方式を採用しているため未燃燃料の排出が避けられず、天然ガスやメタンを燃料に用いる場合、大気中に温室効果係数が高いメタン（CH₄）が排出されるメタンスリップが課題となっている。そのため、メタンスリップに関する研究がなされているが、その対象は排ガスに含まれる未燃のメタンのみである²⁾。一方でCH₄は排ガスだけでなく、クランクケースから排出されるブローバイガスにも含まれており、ガス機関からのGHG排出の一因になっていると考えられる。さらに、船用に用いられるような大型

のガス機関において、ブローバイガスの CH_4 を含む燃料成分の排出量を評価した報告例は少なく、その排出の実態は明らかになっていない。しかし、自動車用機関では、ブローバイガスの排出に関する調査は多く^{3,4)}、すでにブローバイガスにオイルミストや炭化水素などの大気汚染物質が含まれていることから大気放出は禁止されており、吸気に還流させる等の対策が講じられている⁵⁾。一方で、大型の船用機関においてはクランクケース内のオイルミスト濃度計測が義務付けられているものの⁶⁾、ブローバイガスの大気放出についての規制はなく、そのまま船外に排出されることが多い。本研究ではまず、ブローバイガス排出の実態を明らかにし、次に課題を解決する具体的な手法の効果を確認した。具体的には、まず発電出力400kWの実機ガス機関を用いてブローバイガスの組成分析と流量計測を実施し、この結果からブローバイガス排出に伴うメタンスリップ量および損失している燃料成分の熱量を評価した。次に、このメタンスリップの排出削減とブローバイガス中に損失していた燃料の回収のための技術として、ブローバイガスの吸気への還流を考えた。同手法の有効性を確認するため、実機ガス機関に対してブローバイガスの全量を還流する実験を実施して、ブローバイガス還流が排ガス成分へ及ぼす影響と燃料消費量の改善効果を評価した。

「燃料を変える道筋」の課題については、クランクケース内への水素混入とそれに伴うクランクケース内での予期せぬ燃焼の発生を想定した。リーンバーンガス機関において、水素混焼時にはクランクケース内に天然ガスに加えて水素が流入すると考えられる。水素は、天然ガスの主成分であるメタンと比較して最小着火エネルギーが低く可燃範囲が広い⁷⁾ため、クランクケース内に水素が流入すると、着火・燃焼の危険性が高まると予想される。したがって安全に水素混焼ガス機関を運転するためには、水素混焼時のクランクケース内ガスの可燃性を評価するとともに対策を検討する必要がある。そこで、本研究では水素混焼時の実機ガス機関のクランクケース内ガスに対して、水素を含む可燃性成分の濃度を計測した。計測した各可燃成分の体積分率から可燃下限を推定し、クランクケース内の可燃性分合計濃度と比較することで安全性評価を行うとともに、対策の検討を行った。

1.2 本研究におけるブローバイガスの定義

図1に本研究におけるブローバイガスの定義を図示した。他の研究では、ピストンとシリンダライナの間隙からの吹き抜けをブローバイガスと定義している場合もあるが⁷⁾、本研究ではクランクケースから排出されるガスと定義した。ブローバイガスは、排ガス・予混合気・蒸発した潤滑油・空気・燃焼過程のガスの混合ガスである。図1中にそれぞれのガスの排出経路を示す。図に示した通り、各種のガスは一旦クランクケースに集まる。その主たるものは、ピストンとシリンダライナの間隙から流入する排ガス、燃焼過程のガス、予混合気である。また、クランクケース内が高温になるとケース内で潤滑油が蒸発する。さらに、潤滑油の戻りラインやプッシュロッドのライン等のクランクケースに直結するラインからも空気や排ガスがケース内に流入している。これらのガスがクランクケース内で混合し、ブローバイガス配管から排出されるものがブローバイガスである。



2. 実験方法

2.1 供試機関

図2に実験に使用したリーンバーンガス機関の概観、表1にその諸元をそれぞれ示す。本ガス機関は、補機および電気推進船に用いられる主発電機を想定したもので、定格発電出力 400 kW、回転速度 1800 min⁻¹の補機特性を持つ。着火方式として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、その供給方法は、各気筒供給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。試験に用いた都市ガスの性状を表2に示す。

水素混焼時は、各気筒の給気ポートに取り付けられている都市ガスインジェクタの近くに追加した水素インジェクタを用いて水素を供給した。なお、水素の噴射時期および期間は、給気行程におさまるように制御した⁸⁾。



図2 リーンバーンガス機関の外観

表1 機関の諸元

機関名	AYG20L-SE (ヤンマー)
型式	高速4ストローク
定格発電力/回転速度	400kW/1800 min ⁻¹ (60 Hz)
シリンダ径/行程	155mm / 180mm
噴射方式	ポート噴射
燃焼方式	希薄燃焼 / 副室火花点火

表2 燃料ガスの性状

CH ₄	87.3 vol.%
C ₂ H ₆	6.8 vol.%
C ₃ H ₈	4.6 vol.%
n-C ₄ H ₁₀	0.6 vol.%
i-C ₄ H ₁₀	0.6 vol.%

2.2 計測方法

図3にブローバイガス計測の概観を示す。ブローバイガスは、クランクケース内ガスを大気中に放出するための配管からサンプリングし、ガスクロマトグラフ (Agilent Technologies 社製, 490 Micro GC) によってガス組成を分析した。なお、ガスクロマトグラフにサンプルを導入する前に前処理装置 (日本サーモ社製, SAMPLE GAS CONDITIONER MODEL 4N-300) を設置し、フィルタによる異物除去と 4°C への冷却による水分除去を行った。ガスクロマトグラフで分析したガス成分は、水素 (H₂)、酸素 (O₂)、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、エタン (C₂H₆)、エチレン (C₂H₄)、プロパン (C₃H₈)、プロピレン (C₃H₆)、ブタン (n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀) である。流量計測にはルーツ式ロータリーガスメータ (日本フローコントロール社製, CGR-01-DN50-G10p) を用いた。排ガス流量はカーボンバランス法により算出した。また、排ガス成分についても同様の計測を行った。

リーンバーンガス機関

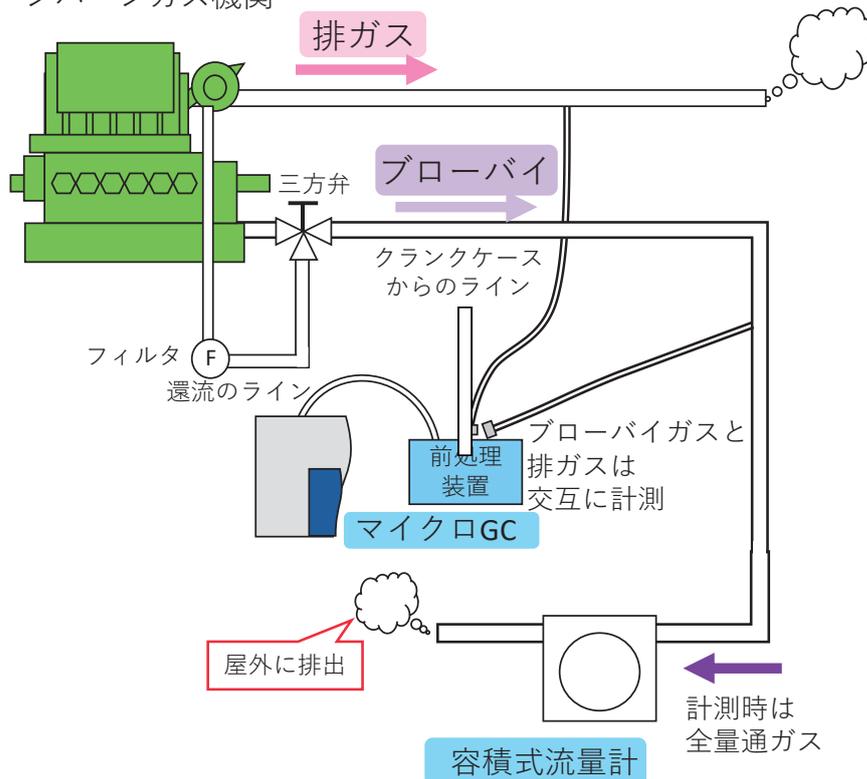


図3 ブローバイガス計測の概観

2.3 実験条件

2.3.1 ブローバイガス計測

ガス機関は回転速度一定の発電機特性で運転し、負荷率は50%、75%、100%の3条件とした。機関回転速度は 1800 min^{-1} とした。

2.3.2 ブローバイガス還流実験

ブローバイガスの配管を改造し、通常時は屋外に放出しているブローバイガスの全量を過給機コンプレッサ入り口に戻した。ガス機関は回転速度一定の発電機特性で運転し、負荷率は50%、75%、100%の3条件とした。機関回転速度は 1800 min^{-1} とした。

2.3.3 水素混焼時のブローバイガス計測

ガス機関の運転条件は、補機として使用頻度の高い負荷率50%に設定した。水素の都市ガスに対する混焼率は発熱量割合で、0%、2.5%、5%、10%、20%、30%、40%、50%とした。点火時期は -13.3° ATDC で一定とし、給気マニホールド圧力も一定とした。機関回転速度は 1800 min^{-1} とした。

3. ブローバイガスにおけるメタン排出と対策

3.1 ブローバイガスの組成

まず、ブローバイガスの流量は、50%負荷で $2.63 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、75%負荷で $3.33 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、100%負荷で $4.09 \text{ Nm}^3/\text{h}$ であり、排ガス流量（50%負荷で $1149 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、75%負荷で $1632 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、100%負荷で $2034 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ）に対して0.25-0.26%と少なかった。

図4に都市ガスで運転した場合のブローバイガス中および排ガス中のCH₄濃度を示す。各条件において5回の計測を実施しており、最初の一回目および明らかな異常値を除いた3-4点のデータを図中に示した。ブローバイガス中のCH₄濃度は2.2-2.5%であった。同じ条件で運転した際の排ガス中のCH₄濃度は0.2-0.3%であり、排ガス中のCH₄濃度と比較して、ブローバイガス中のCH₄濃度は著しく高かった。次に図5にCH₄以外の都市ガス成分である、C₂H₆、C₃H₈、n-C₄H₁₀、i-C₄H₁₀の濃度を示す。図4で示したCH₄濃度の結果と同様に、ブローバイガス中の各都市ガス成分の濃度は排ガス中の濃度と比較して高かった。図6に都市ガスとブローバイガス中の燃料成分(CH₄、C₂H₆、C₃H₈、n-C₄H₁₀、i-C₄H₁₀)の比率を示す。都市ガス組成は代表値を用いた。同図から都市ガス組成とブローバイガス中の燃料成分の比率は近く、また負荷率による組成の変動もほとんどないことから、未燃の都市ガス成分がそのままの組成でブローバイガス中に存在していることが分かった。また、本条件の実験では都市ガス中には含まれない燃焼中間生成物であるC₃H₆は、定量的な評価は難しかったが、クロマトグラム上にはピークが認められたことから、微量の燃焼中間生成物がブローバイガス中に含まれていると考えられた。図7にO₂、CO₂の計測結果を示す。ブローバイガス中のCO₂濃度は0.4-0.7%、O₂濃度は21%と大気中に近い濃度であった。

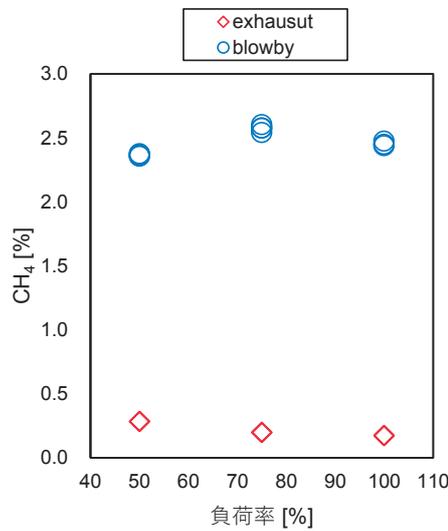


図4 都市ガス運転時のブローバイガス中および排ガス中のCH₄濃度

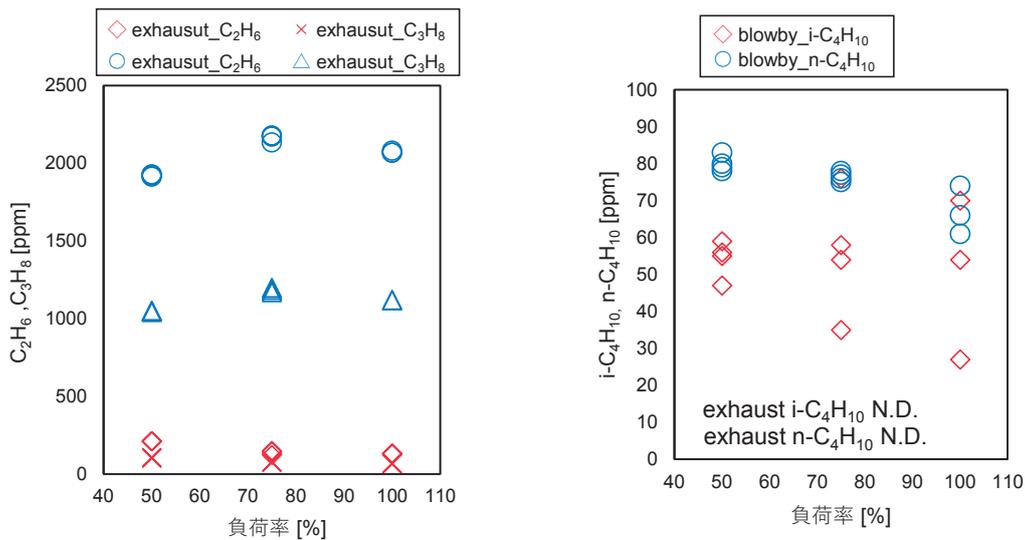


図5 都市ガス運転時のブローバイガス中および排ガス中のC₂H₆、C₃H₈、n-C₄H₁₀、i-C₄H₁₀の濃度

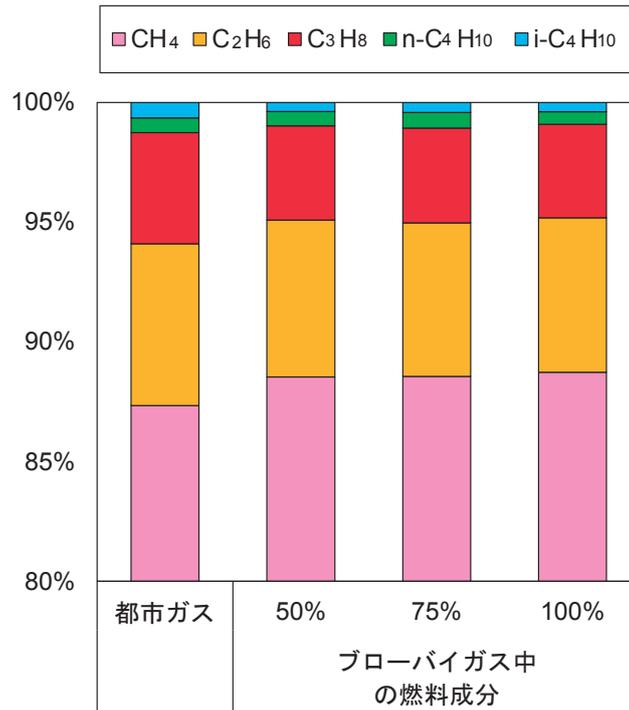


図6 燃料ガス組成とブローバイガス中の燃料成分(CH₄, C₂H₆, C₃H₈, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀)の比率

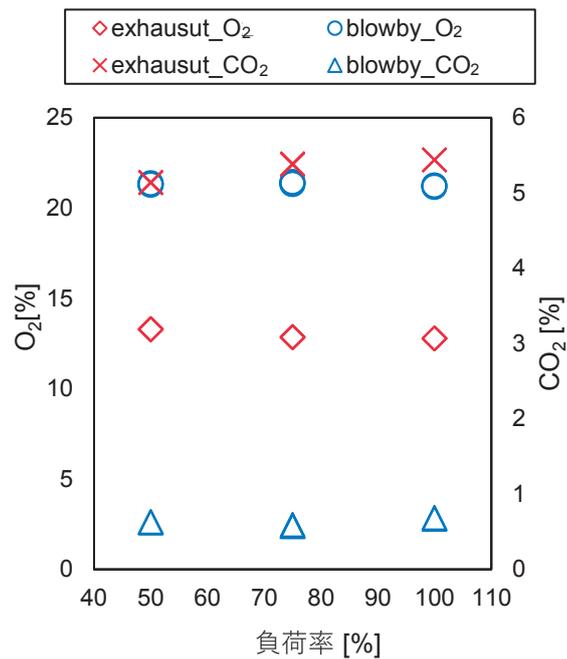


図7 都市ガス運転時のブローバイガス中および排ガス中のO₂, CO₂濃度

図1に示したようにブローバイガスには排ガス、予混合気、蒸発した潤滑油、空気、燃焼過程のガスが含まれる。ここではブローバイガス中の主要な構成ガスである排ガス、予混合気、空気の比率を検討した。ブローバイガスおよび各構成ガス中のCO₂濃度およびブローバイガス、排ガス、および予混合気中の都市ガス成分(CH₄, C₂H₆, C₃H₈, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀)の濃度を用いて、式(1)から式(3)より、ブローバイガス中の排ガス、予混合気、空気の比率を計算した。

$$1 = Z_{air} + Z_{pre} + Z_{exh} \quad (1)$$

$$X_{CO_2_b} = X_{CO_2_{air}} \cdot Z_{air} + X_{CO_2_{pre}} \cdot Z_{pre} + X_{CO_2_{exh}} \cdot Z_{exh} \quad (2)$$

$$X_{FG_b} = X_{FG_{air}} \cdot Z_{air} + X_{FG_{pre}} \cdot Z_{pre} + X_{FG_{exh}} \cdot Z_{exh} \quad (3)$$

ここで、 Z_{air} はブローバイガス中の空気の比率、 Z_{pre} は予混合気の比率、 Z_{exh} は排ガスの比率である。 $X_{CO_2_{air}}$ は大気中の CO_2 濃度、 $X_{CO_2_b}$ はブローバイガス中の CO_2 濃度、 $X_{CO_2_{pre}}$ は予混合気中の CO_2 濃度、 X_{FG_b} はブローバイガス中の都市ガス成分濃度、 $X_{FG_{pre}}$ は予混合気中の都市ガス成分濃度、 $X_{FG_{exh}}$ は排ガス中の都市ガス成分濃度である。計算に使用した数値を表3に示す。式(1)から(3)の連立方程式を解くことで、ブローバイガス中の空気、予混合気、排気の比率を算出した。その結果を図8に示す。どの負荷率においても、排ガスが約10%、予混合気が約60%、空気が約30%であった。また、今回の実験では検出できなかったが、わずかに燃焼過程のガスや蒸発した潤滑油が含まれていると考えられた。

エンジンにおいて予混合気が存在する箇所はシリンダ内である。シリンダ内ガスがクランクケースに流出する主要経路はピストンリングの合口であることが知られている。膨張・排気行程ではシリンダ内は燃焼ガスで満たされるが、ピストンリング合口に流入するガスは、ピストントップランド部の火炎が到達しない未燃領域のガスである。したがって、吸気・圧縮・膨張・排気の全行程で、シリンダ内からクランクケースに流出するガスの大部分は予混合気と考えられる。実際、図8に示した結果からわかるように、ブローバイガスの半分以上はシリンダ内から流出した予混合気が占めている。

表3 ブローバイガス中の排ガス，予混合気，空気の比率の計算に用いた数値

		50%	75%	100%	
	式中の記号	vol%			
空気中の CO_2 濃度	CO_2_{air}	0.042	0.042	0.042	計算
予混合気中の CO_2 濃度	CO_2_{pre}	0.040	0.040	0.040	計算
ブローバイ中の CO_2 濃度	CO_2_b	0.627	0.578	0.678	実測
排ガス中の CO_2 濃度	CO_2_{exh}	5.138	5.379	5.439	実測
予混合気中の燃料ガス濃度	FG_{pre}	4.156	4.224	4.222	計算
ブローバイ中の燃料ガス濃度	FG_b	2.676	2.922	2.786	実測

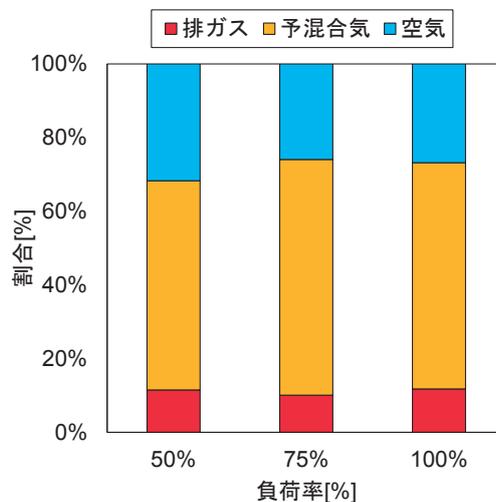


図8 計測値から試算したブローバイガス中の各種ガスの比率

排ガス中の燃料ガス濃度	FG_exh	0.315	0.219	0.194	実測
-------------	--------	-------	-------	-------	----

3.2 ブローバイガス排出に伴うメタンスリップ量および損失している燃料成分の熱量

ブローバイガス排出に伴うメタンスリップ量および損失している燃料成分 (CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₃H₆, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀) の熱量を試算した。表4にブローバイガス中および排ガス中の CH₄ 排出率、排ガス中の CO₂ 排出率とブローバイガス中 CH₄ の GHG 排出への寄与度を示す。ここでブローバイガス中の CH₄ の GHG 排出への寄与度は、排ガス中 CO₂ 排出率および CH₄ 排出率に対するブローバイガス中の CH₄ 排出率の割合であり、CH₄ 排出率にはそれぞれ温室効果係数 26 を掛けた。ブローバイガス中の CH₄ 排出率の排ガス中の CH₄ 排出率に対する割合は、1.7-3.2 % だった。また、ブローバイガス中 CH₄ の GHG 排出への寄与度は、0.7-0.8 % だった。したがってエンジンから排出されるメタンスリップ量は、排ガスに含まれる CH₄ が主要因であり、ブローバイガス中に含まれる CH₄ の影響は少なかった。

次に表5にブローバイガス中への損失した熱量、供給燃料の熱量およびブローバイガス中へ損失していた割合を示す。ブローバイガス排出によって損失していた熱量は CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₃H₆, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀ の濃度を用いて試算した。ブローバイガス排出によって損失していた熱量の割合は 0.2~0.3% と小さかったが、船舶の運航費に占める燃料費の割合が大きいこと、ブローバイ回収に関わる装置が配管やオイルミストフィルタなど比較的簡易であることから、費用対効果は有意であると考えられる。またカーボンニュートラルの実現のためには、ブローバイガスによる CH₄ の排出も削減する必要があることから、実際に還流実験を行いその効果を確認した。

表4 ブローバイガス中および排ガス中の CH₄ 排出率、排ガス中の CO₂ 排出率とブローバイガス中 CH₄ の GHG 排出への寄与度

	CH ₄ 排出率		排ガスの CH ₄ 排出率に対する ブローバイガス中の CH ₄ 排出 率の割合	CO ₂ 排出率	ブローバイガス中 CH ₄ の GHG 排出への寄与度
	ブローバイ ガス	排ガス		排ガス	
	g/kWh	g/kWh	%	g/kWh	%
50%	0.26	15.7	1.7	575.9	0.7
75%	0.21	8.7	2.4	497.6	0.8
100%	0.21	6.3	3.2	481.2	0.8

表5 ブローバイガス中への損失した熱量、供給燃料の熱量およびブローバイガス中へ損失していた割合

	ブローバイガス中への損失分[kW]	供給燃料熱量[kW]	損失[%]
50%	1.3	476	0.3
75%	1.5	627	0.2
100%	1.9	785	0.2

3.3 ブローバイガス還流の効果

図9に還流の有無による CH₄ 排出率の変化を示す。還流無し場合の CH₄ 排出率は、排ガスとブローバイガスの CH₄ 排出率の合計となる。第3.2節で述べた通り、ブローバイガス中の CH₄ 濃度が 2.0-2.5% と高いものの、流量が非常に少ないため、排出率で比較すると排ガスの CH₄ 排出率より低くなっている。還流有の場合はブローバイガスを全量還流しているため、排ガスの CH₄ の排出のみになる。還流の有無によって排ガス中の CH₄ 排出率の変化は見られなかった。すなわち、ブローバイガスの排出率分は還流によって削減することができた。

次に図10にブローバイガスによる熱量損失割合と還流による燃料流量の減少率を示す。ブローバイガスによる熱量損失割合は、燃料供給熱量に対するブローバイガス中に損失していた燃料熱量の割合である。還流時の燃料流量の減少率を比較すると、100% 負荷以外ではほぼ同等であった。このことは、100% 負荷以外では、予想された燃料消費量の改善が出来ており、ブローバイガスの還流によって、燃費の改善が 0.2-0.3% 見込めることがわかった。

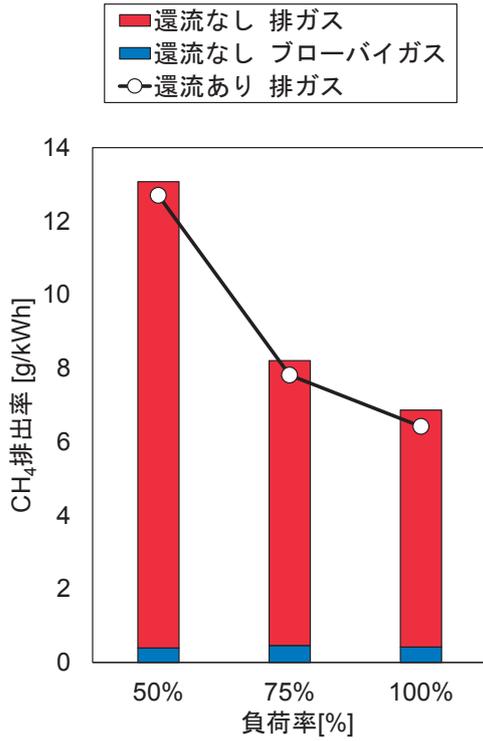


図9 還流の有無によるCH₄排出率の変化

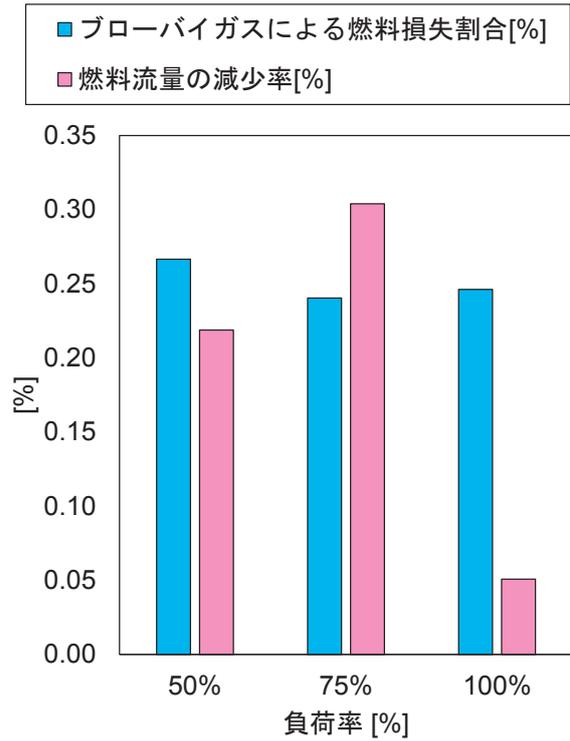


図10 ブローバイガス中に損失していた熱量の割合および還流による燃料消費率の変化

4. 水素混焼時におけるブローバイガスの安全性評価

4.1 水素混焼時のブローバイガスの組成

図11に水素熱量混合率に対するブローバイガス中のH₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₂H₄, C₃H₆, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀の濃度を示す. 同図からブローバイガス中の水素濃度は, 水素熱量混合率の増加に比例して増大することがわかる. 一方, 都市ガス成分であるCH₄, C₂H₆, C₃H₈, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀は, 水素熱混合率の増加に伴い減少することがわかる. これは水素の混焼によって都市ガスの供給量が減ったことに起因している. 燃焼中間生成物であるC₂H₄およびC₃H₆は非常に低濃度であった. 第3.1節に述べたように, ブローバイガスへの燃料流入の主要因はシリンダ内予混合気がピストン合口の隙間を経由してクランクケース内に流入することである. 従って, ブローバイガス中のH₂濃度が高濃度であることは, 水素の体積あたりの発熱量が低いために都市ガス専焼時と比べて予混合気中の燃料濃度が増大したことが要因と考えられる.

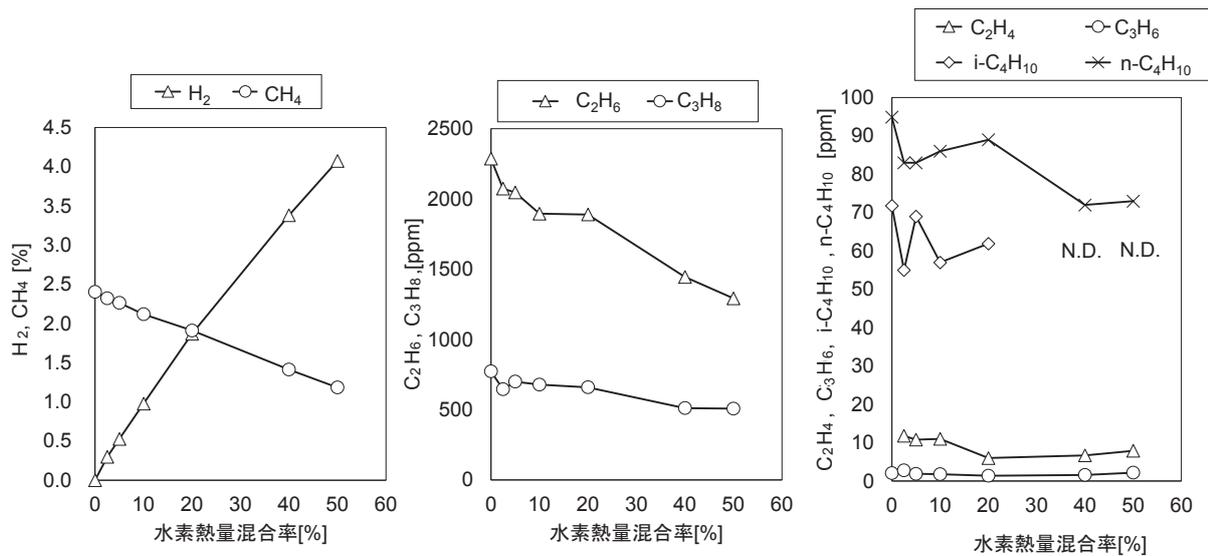


図 11 水素熱量混合率に対するブローバイガス中の H₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₂H₄, C₃H₆, n-C₄H₁₀, i-C₄H₁₀ の濃度

4.2 水素混焼時のブローバイガスの可燃範囲試算

燃料と空気の混合気は燃料濃度が可燃範囲に入ると着火源があることにより着火燃焼する。そのため、クランクケース内の安全性を評価するためには、クランクケース内の可燃成分濃度が可燃範囲に入っているかを評価する必要がある。そこで、ブローバイガス中に含まれる可燃成分の可燃下限界を推定し、実測したクランクケース内の可燃成分濃度と比較して、安全性を評価した。可燃成分は、水素と都市ガス成分である H₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ を対象とした。混合気の可燃下限界 L はルシャトリエの式(4)を用いて推定した⁹⁾。また、任意の温度 t における可燃下限界 $L(t)$ は式(5)を用いて推定した⁹⁾。

$$L = 100 / \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{L_i} \right) \quad (4)$$

$$L(t) = L(25^\circ\text{C}) - 0.75(t - 25) / \Delta H_c \quad (5)$$

ここで、 L_i は i 成分の可燃下限界 [vol.%], n_i は i 成分の体積分率 [vol.%], $L(t)$ は任意の温度 t における可燃下限界 [vol.%], ΔH_c は発熱量である。式(5)の $L(25^\circ\text{C})$ は文献値を使用し、表 6 に参照した各成分の可燃下限界を示す⁵⁾。本機関のクランクケース内温度は 80-90 °C の範囲にあったため、図 12 には 80 °C と 90 °C および参考として常温 (25°C) の可燃下限界およびブローバイガス中に含まれる可燃成分合計濃度を示した。可燃下限界は温度によらず水素熱量混合率が増加するほど低下した。また、温度が上昇するとその濃度は低下した。したがって、高温になるほど、低濃度で可燃範囲に入ることがわかった。ブローバイガスの可燃下限界と可燃成分濃度と比較すると、クランクケース内温度においては、水素熱量混合率が約 20% で可燃成分濃度は可燃下限界に達していた。このため水素熱量混合率をさらに増加するとクランクケース内ガスは着火・燃焼が可能な危険な状態になることがわかった。したがって高い水素燃料混合率で運転する場合は、クランクケース内のブローバイガスが可燃範囲に入ること防ぐため、可燃成分濃度の監視装置や換気装置の設置が必要と考える。

表6 各成分の可燃下限界⁵⁾

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
可燃下限界[vol.%]	4.00	5.0	3.0	2.12	1.86

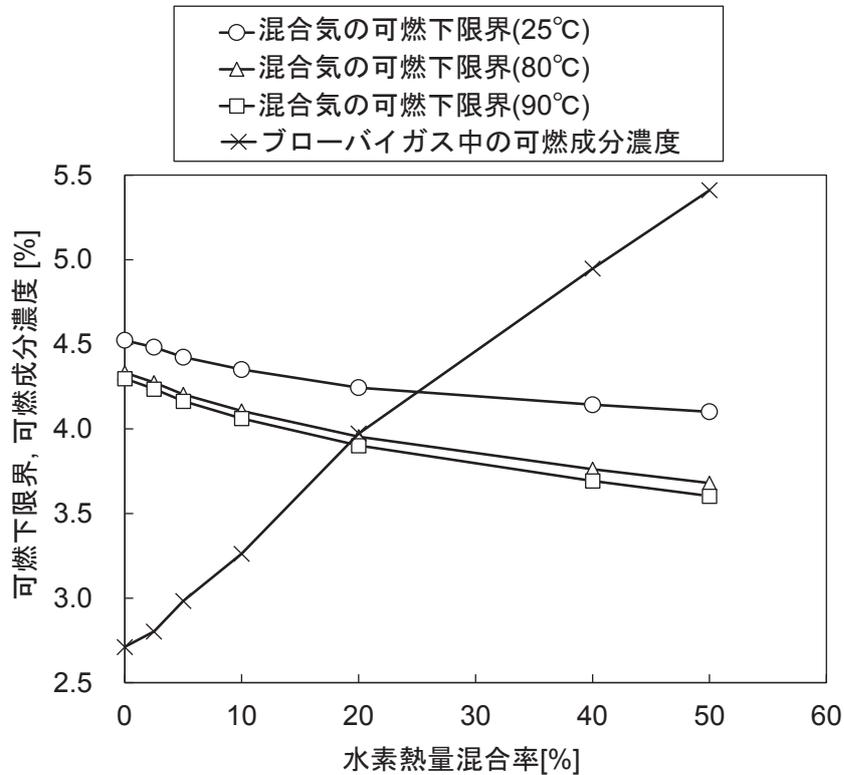


図12 ブローバイガスに含まれる可燃成分合計濃度および可燃下限界とその温度変化

5. まとめ

本研究では、発電出力 400 kW の実機ガス機関を用いて、都市ガス運転時のブローバイガスの組成分析および流量計測を実施した。この結果、ブローバイガス中には CH₄ 濃度が 2.2-2.5% で存在しており、排ガス中の濃度と比較すると高い濃度であった。またブローバイガス中の都市ガス成分の比率は、燃料組成とほぼ同じであり、未燃燃料がそのままブローバイガス中に流出していることがわかった。さらにブローバイガス排出に伴うメタンスリップ量は排ガスに対して 1.7-3.2% であり、損失している燃料成分の熱量は 0.2-0.3% だった。ブローバイガス排出の対策として全量を吸気へ還流した結果、ブローバイガス排出に伴うメタンスリップをゼロにするとともに、ブローバイガスによって損失していた燃料成分を再燃焼することによって燃料消費量を最大 0.2-0.3% 低減できることがわかった。

水素混焼時のブローバイガス計測では、水素熱量混合率 50% の条件においてブローバイガス中に水素が約 4.0% と高い濃度で含まれ、水素の可燃下限界に達することがわかった。実測した可燃成分濃度から可燃混合成分の可燃下限界を推定し、可燃性成分合計濃度と比較した結果、水素熱量混合率 20% でクランクケース内ガスは可燃下限界に到達することがわかった。したがって水素混焼ガス機関は、比較的低い水素混合率でもクランクケース内が着火・燃焼が可能な危険な状態になることがわかった。したがって水素混焼時は、換気等によってクランクケース内の燃料濃度を低下させる対策をする必要がある。

References

- 1) 市川泰久, 関口秀紀, 平田宏一, 船用リーンバーンガス機関の水素混焼技術に関する研究, 日本マリンエンジニアリング学会学術講演会第 88 回講演論文集(2018)
- 2) Yoshifuru Nitta, Yasuhisa Ichikawa, Koichi Hirata, Yudai Yamasaki, Study with Micro-reactor on Deactivation of Pd Methane Oxidation Catalyst for Marine Lean Burn Gas Engines, *Marine Engineering*, Volume 54, Issue 5, P.765-772, (2019)
- 3) 中島 桂太郎, 山川 淑夫, 自動車と大気汚染, *日本機械学会誌*, 73 巻, 618 号, p. 990-999, (1970)
- 4) CIMAC Guideline, H2 in Stationary 4-Stroke Gas Engines for Power Generation, (2021)
- 5) 道路運送車両の保安基準 31 条 (ばい煙, 悪臭のあるガス, 有害なガス等の発散防止装置)
- 6) 新井健太, 國料尚貴, 小見慶樹, 望月勝, 安部昇, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, 47 巻, 6 号 p.882-887, (2012)
- 7) P. A. Lakshminarayanan and P. K. Senthilkuma, Blowby, Breathing and Oil Slobbering from Small Engines, Blowby, Breathing and Oil Slobbering from Small Engines, SAE Technical Paper 2013-26-0123, (2013)
- 8) 市川泰久, 平田宏一, 水素混焼エンジンの現状と課題, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, 54 巻, 5 号, p.694-697, (2019)
- 9) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一, 燃焼現象の基礎, オーム社, pp.37-41, (2001)