

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246144

研究課題名(和文) 気体分離膜を利用した酸素濃度分布の形成による船用ガスエンジンのメタンスリップ低減

研究課題名(英文) Reduction of Methane Slip from Marine Gas Engines by Oxygen Stratification using Gas Permeation Membrane

研究代表者

田島 博士 (TASHIMA, Hiroshi)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70179688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、熱効率や燃料価格および対排出物の優位性から船舶応用が進められている希薄予混合燃焼ガスエンジンを対象とし、気体分離膜を利用する過給システムを構築してシリンダ壁近傍を高酸素濃度、燃焼室中央部を低酸素濃度とする混合気の成層分布を形成して、異常燃焼の抑制による高効率化と温暖化に有害なメタンスリップの大幅低減の実現を目指した。

数値予測により、過給機の所要熱効率の妥当性と高酸素濃度給気分離率の実用限界、圧縮後の成層給気の残存度、およびメタンスリップ低減割合を定量的に検証し、さらに定容燃焼容器と急速圧縮膨張装置による燃焼実験を通じて、提唱した過給システムで所期の目標が達成できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Gas engines are expected as strong substitutes for marine diesel engines, but premixed lean-burn gas engines suffer two massive flaws. One is abnormal combustion called knocking and the other is methane slip. This research proposes a novel reducing method of the methane slip through usage of a gas permeation membrane (GPM). The GPM forms stratified oxygen gradient inside a combustion chamber. O₂-rich premixture biased toward a cylinder wall decreases a quenching distance and N₂-rich premixture around a cylinder center controls knock tendency and NO_x emission. Following issues were numerically investigated, feasibility of a twin turbo-charging system, possibility of oxygen stratification during compression, and potential of the methane slip reduction on chemical analysis. Finally, combustion tests were done using a constant-volume chamber and a rapid compression-expansion machine, and the system was found to compromise the knock avoidance and the methane slip reduction effectively.

研究分野：熱機関工学，熱力学，船用工学，燃焼工学

キーワード：ガスエンジン 気体分離膜 メタンスリップ 天然ガス 窒素酸化物 ノッキング

1. 研究開始当初の背景

船舶からの窒素酸化物(NO_x)や硫黄酸化物(SO_x)の排出規制が2016年に強化されるのに伴い、船用ディーゼル機関に排気再循環(EGR)や選択触媒還元(SCR)等の適用が進められているが、設備投資と運転費の高騰が問題化している。このため、硫黄を含まない天然ガスを燃料とし、後処理抜きでNO_x規制を満足できる希薄予混合燃焼のガスエンジンで主機を代替することが検討されている。

希薄予混合燃焼ガスエンジンではNO_xと未燃炭化水素(UHC)の排出はトレードオフの関係にあり、NO_x排出率の低減要求が強い低負荷域で温暖化係数が25に達する未燃メタン排出(メタンスリップ)が増加すると、CO₂削減効果が著しく損なわれる恐れがある。

船用ガスエンジンの開発で先行する欧州では未燃メタン低減の重要性が認識されているが、低負荷(温度)域で未燃メタンを浄化できる酸化触媒は確立しておらず、現状は隙間容積の削減など対症療法的な改善に留まっており、抜本的な解決策が希求されている。

2. 研究の目的

熱効率と燃料価格の優位性、排気の低公害性から船舶への転用が検討されている希薄予混合燃焼ガスエンジンを研究対象として、気体分離膜(Gas Permeation Membrane; GPM)を利用した新しい過給システムを構築することでシリンダ内壁近傍を高酸素濃度、燃焼室中央部を低酸素濃度とする成層化混合気分布を形成し、異常燃焼の抑制による高効率化と温暖化に影響するメタンスリップの大幅低減を両立することを目的とする。

3. 研究の方法

図1の本研究で提唱した過給システムの概要から説明する。主圧縮機の後にGPMを隔壁とする絞り流路を設け、GPM外表面(2次側)に透過した給気を副圧縮機に導く複合過給システムであり、以下では消炎距離低減膜(Anti-Quenching Membrane; AQM)と仮称する。

GPMは微小孔を有する有機膜により分子直径が窒素より小さい酸素を選択的に透過させるため、2次側の透過給気は酸素富化空気(Oxygen Enriched Air; OEA)に、内表面の1次側の給気組成は窒素富化空気(Nitrogen Enriched Air; NEA)へと変化する。OEAとNEAは独立した2つの給気管路から燃焼室に供給され、前者がクレブリス容積の集中するシリンダ内壁近傍、後者がパイロット噴射弁の位置するシリンダ中央部に導入される。

AQMでは、OEA側の混合気にメタンスリップ低減、NEA側の混合気にノッキング裕度増大とNO_x低減の効果を期待できる。核心であるOEA混合気のメタンスリップ低減は、当量比を固定した場合、混合気の消炎距離が酸素濃度に逆比例ではなく指数的に減少する事実に依拠している。また、消炎距離の短縮がメタンスリップ低減に結びつく根拠として、消炎距離の短い水素を混合した天然

ガスを用いたガスエンジンで、水素混合割合から予測される以上にメタンスリップが減少するという多数の報告例が挙げられる。

本研究では、以下の諸項目を遂行することで、AQMの実現可能性を多角的に検証した。

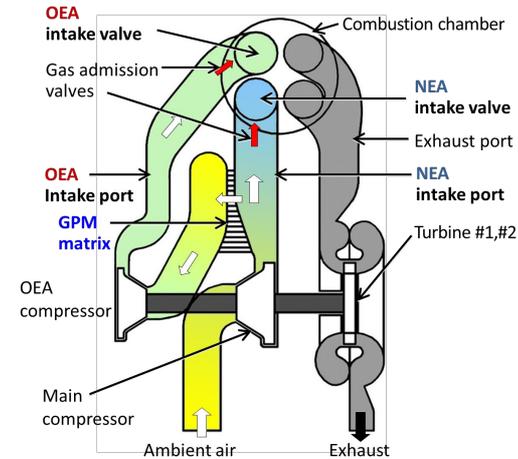


図1 AQMを用いるエンジンシステムの概要

(1) 吸排気エネルギーバランスの数値予測

AQMは、OEMを主過給機の過給圧を駆動力として分離し、さらに副過給機で再圧縮するため、過給機に求められる性能が通常のエンジンよりも高く、システム成立の要件となる。AQMを模擬する様々な検討に先立ち、表1と図2に主要諸元とエンジン要素モデルを示した仮想の中型ガスエンジンを対象として、1次元エンジンシミュレータ; GT-Power (Gamma Technologies社)により、OEA分離率と両過給機性能との相関を調査した。分離膜の前後差圧とOEA透過率との関係は、旭化成エンジニアリング製のGPMを参考にした。

表1 AQM模擬用1次元シミュレータ用エンジン諸元

Engine type	4 st. cycle, inline 6 cyl.	Pilot fuel	Gas oil
Ignition / Combustion	Pilot ign./ Premixed lean-burn	Main gas fuel	Natural gas (Town gas)
Bore × Stroke	φ200 mm × 300 mm	BMEP	2.0 MPa
Rated speed	900 rpm	Air excess factor	1.8 ~ 2.0
Comp. ratio	14.2		

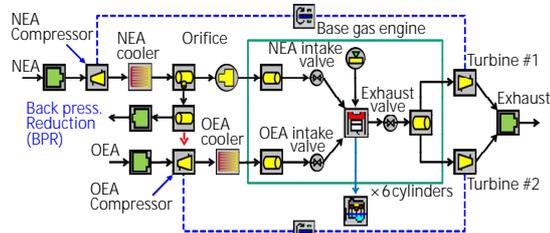


図2 AQM模擬用エンジン要素モデル

(2) 燃焼室内の酸素濃度と速度分布の予測および検証

AQMでは、独立した吸気管から燃焼室に導入したNEAとOEA各々の混合気が、上死点付近でも成層化された状態を保つことが重要であり、その検証が必要である。表2と図3に主要諸元と概要を示す、本研究

の主要な燃焼実験装置である急速圧縮膨張装置(Rapid Compression- Expansion Machine; RCEM)について、ガスサンプリング弁による圧縮行程前半の筒内新気の酸素濃度計測、および3D-CFDコード; FIRE (AVL社)による吸気行程中のNEA/OEA混合気の成層化過程や圧縮行程中の均一化過程について数値予測を行った。また、主要購入品である粒子画像速度測定法(Particle Image Velocimetry; PIV)装置を用いて、RCEMにおいてOEA混合気の導入に伴う筒内旋回流(スワール)の強化を定量的に評価した。RCEMの詳細は後述する。

表2 急速圧縮膨張装置(RCEM)の主要諸元

Base engine	4stroke cycle, 1cyl.
Bore × Stroke	φ240 mm × 260 mm
Con rod length	520 mm
Clearance volume	φ240 mm × h50 mm
Compression ratio	6.0
Engine speed	300 rpm
Quartz window	φ125 mm × t62 mm

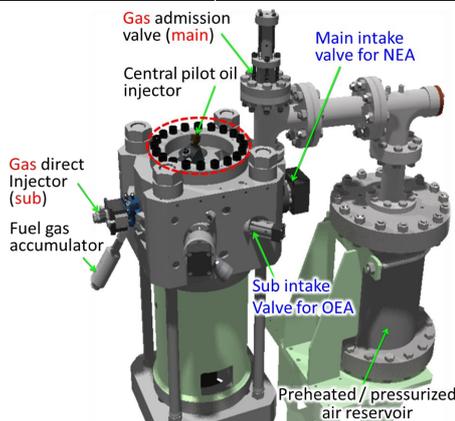


図3 AQM 模擬実験におけるRCEMの概要

(3) メタンスリップ低減効果の数値予測 燃焼実験に先立ち、いずれもオープンソースである3D-CFDコード; KIVA-3V(ERC版を独自改良)と、詳細化学反応計算パッケージ; SENKINを連成させ、AQMによるメタンスリップ低減効果を数値計算により確認した。メタンの素反応スキームには、Gas Research InstituteのGRI-Mech 3.0を簡略化せずに用い、圧縮初期条件に完全成層混合を仮定し、OEA混合気の配分比率や酸素濃度を变化させて、膨張行程後半での未燃メタン量を比較した。表3にKIVA-3V・SENKIN連成コードにおけるサブモデルや反応スキームの構成を示し、図4は計算空間とその分割状況を示している。表1の諸元を有する中型ガスエンジンが予測対象であり、計算負荷削減のため、円筒座標系で開き角60°のセクターメッシュを採用し、

表3 KIVA-3VのサブモデルとSENKINにおける燃焼の化学反応スキーム

Droplet breakup	Primary: Blob method, Secondary: KH-RT model
NO generation	Extended Zeldovich mechanism
Comb. scheme	n-heptane: ERC Diesel methane: GRI 3.0 (SP:53, RC:325)

通常の浅皿形燃焼室を単純円筒形のキャピティで近似している。なお、本予測ではピストン部にクレヴィス容積は含まれていない。

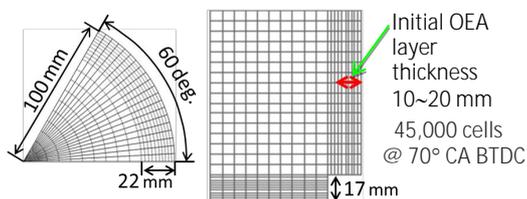


図4 計算対象ガスエンジンの計算空間と分割状況

(4) メタンスリップ低減効果の定容燃焼容器による実証 ガスエンジンのメタンスリップの主発生源はクレヴィス容積とみなされているが、RCEMでは下方に位置するピストンリングの制約により、クレヴィス容積の寄与を過大評価する恐れがある。本研究では計画を一部変更し、クレヴィス容積を排除でき、さらに混合気の理想的な成層化を実現する定容容器を用いた燃焼実験を先行実施した。図5は急速収納できる厚さ2mm、平均直径φ207mmの円筒隔壁を有する定容燃焼容器(ボアφ240mm、高さ50mm)の概要である。隔壁で内外に2分された空間に、夫々NEAとOEA由来の混合気を供給し、隔壁を容器底面に収納した後に、燃焼室中央から火花点火して、燃焼中の筒内圧変化と燃焼後の筒内ガス組成(CO, CO₂, UHC, NO_x, O₂)を計測する。NEAとOEAの酸素濃度と供給比率は、両者合計の酸素濃度が標準空気と等しい21 vol.%となるように設定し、均一混合気による燃焼との熱発生経過・排出物特性を比較した。

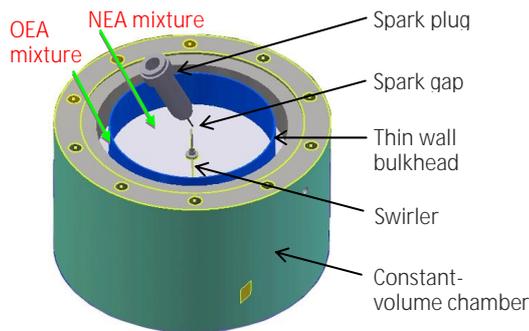


図5 隔壁付き混合気成層化定容燃焼容器の概要

(5) メタンスリップ低減効果の急速圧縮膨張装置による実証 研究の最終段階では、前述したRCEMによる燃焼実験にてAQM導入によるメタンスリップ低減効果を検証とした。表4に実験条件の一覧を示す。NEAとOEAの酸素濃度と比率の設定は定容燃焼容器の例と同様であるが、給気方法が異なっている。RCEMは単発の燃焼実験装置であり、筒内を密閉状態にした駆動運転で所定の回転数到達後に、一回のみの吸気、実圧縮および燃焼・膨張の行程を経る。通常、主吸気弁から加熱・加圧空気を、主吸気弁背後のガス供給弁からメタンを低圧噴射することで、吸気行程中に混合気を形成している。AQM模擬実験では、主吸気弁からNEAを供給し、さら

に接続方向に傾けた副吸気弁から高圧の OEA を、ガス直接噴射弁からメタンを噴射することで、シリンダ内壁近傍に OEA 由来の混合気を集中的に形成した。

表 4 RCEM を用いた燃焼実験の条件一覧

Gas fuel / pilot fuel	Pure methane / Gas oil (JIS#2)
Comp. condition	Temp. 780 K, Press. 8.0 MPa
Pilot injection (CA: crank angle)	Pressure: 90 MPa
	Timing: -8.5° CA ATDC
	Duration: 10° CA
Mixture condition of premixed lean-burn experiments	
O ₂ vol. concentration	Homogeneous (19%, 21%, 25%)
Excess air factor: λ	1.9~3.2
Mixture condition of AQM experiments	
O ₂ vol. concentration Ref.	Homogeneous, O ₂ 21%, $\lambda = 2.1$
O ₂ vol. concentration AQM	O ₂ 19% + 25% (ave 21%), NEA/OEA ≈ 3.0

4. 研究成果

(1) 吸排気エネルギーバランスの数値予測
 図 6 は、GPM の OEA 分離率に対して要求される過給機仕事の熱効率を、GT-Power 上のエンジンモデルによって予測した結果である。熱効率は、NEA/OEA 用の過給機 2 基について、圧縮機とタービンを区別して表示した。左端の白抜き記号は、通常空気過給 (OEA 分離率=0) の場合を示している。AQM では過給機の熱効率向上が必須であるが、特に GPM を機能させる NEA 側圧縮機に大幅な熱効率向上 (25%程度、破線矢印) が求められることがわかる。OEA 分離率が NEA 側過給機の熱効率に与える影響は少ないが、OEA 側過給機の熱効率は OEA 分離量に応じて向上させる必要が生じている。市販過給機の熱効率は圧縮機で 86%程度が上限であり、従って AQM システムでは 25%を超える OEA 分離率は実現困難と推測される。なお、図右端の記号群は分離後の OEA を絞り管路で OEA 用過給機に供給した場合の計算結果を示す。絞り管路では GPM 透過時の流量と圧力損失の関係が再現できないため、30%超の OEA 分離率でも成立するとの誤った評価を与えている。以下、GPM2 次側の低背圧を再現するエンジン要素モデルを用いた吸排気エネルギーバランスの数値予測に基づき、OEA 分離率=25%を AQM の実用上限として検討を進めた。

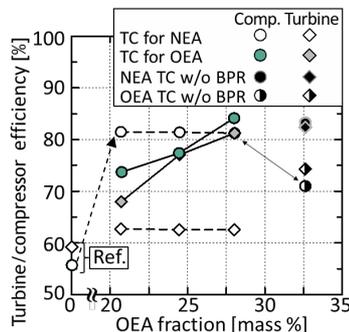


図 6 AQM の成立に必要な過給機効率の予測値

(2) 燃焼室内の酸素濃度と速度分布の予測および検証 RCEM を対象とする数値予測と計測の段階において、水平吸気弁と燃焼室との干渉に起因する計算停止、圧縮下のガスサンプリング弁の作動不良等の困難に直面し、予定していた実機における AQM 用の成層給気実現方法の具体化には到達できなかった。表 5 と図 7 に RCEM で AQM を模擬する際の NEA, OEA と燃料ガスの供給条件、下死点前 40°CA と上死点前 65°CA における筒内の酸素濃度分布の予測結果を示す。表示の色調範囲は NEA と OEA の識別を優先し、実際の分布幅より狭く設定している。燃焼室側壁に沿って導入された副吸気弁からの OEA が給気の成層化を生じていること、圧縮行程では燃焼室中央部との酸素濃度差が減少し、高酸素濃度の領域が燃焼室上隅部に移行することがわかる。また、上死点間隙中央の燃焼室側壁からガスサンプリング弁で採取した、上死点前 61° CA における混合気の酸素濃度は 21.8 vol.% であり、数値予測と良好に一致していた。図 8 は、時系列 PIV で計測した上死点でのスワールの速度分布である。RCEM で副吸気弁を併用した場合、スワールが強化されるとともに、旋回中心が安定して軸対称性も向上しており、成層給気の保持に有利と考えられる。しかしながら、RCEM でも上死点まで酸素濃度の成層分布を保つのは困難と予想されたため、より理想的な成層化が実現される条件下で AQM システムの効果を事前確認した。

表 5 AQM 模擬時の給気・燃料供給条件 (RCEM)

Compression-end pressure	8 MPa	
Charge temperature	240°C	
intake valve	Main (NEA)	Sub (OEA)
O ₂ vol. concentration	19 %	25 %
open timing	220° CA BBDC	230° CA BBDC
duration	230° CA	←
port pressure	1.25 MPa	2.7 MPa

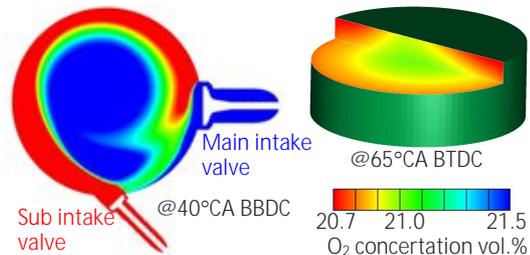


図 7 RCEM における給気成層化の数値予測例

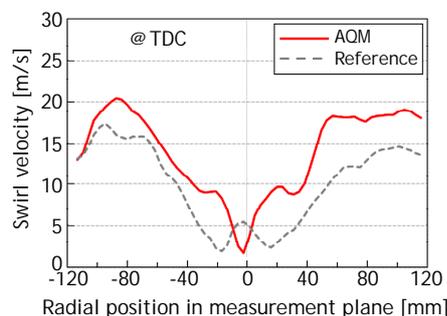


図 8 RCEM におけるスワール方向成分の速度分布

(3) メタンスリップ低減効果の数値予測 予混合火炎伝ばを、大型機関で現実的な空間分割で再現する場合、未燃セルの温度上昇が緩慢となって、火炎伝ば速度が極端に低下する。火炎面を表すスカラー量の移送方程式を組み込むモデルも提唱されているが、成層給気では検証されていない。本研究では、OEA 層厚さがメタンスリップに与える影響に着目し、総括空気過剰率は一定($\lambda=1.8$)のまま、シリンダ壁近傍の OEA 層の厚さと酸素濃度を変更して、燃焼室中央部は NEA の代わりに標準空気($O_2=21$ vol.%)で満して計算を行った。表 6 と図 9 は、仮想の中型ガスエンジンにおいて予測された、OEA 混合気層の初期厚さ、膨張行程後半での UHC 濃度(メタンスリップ率)と NO 濃度増加率の一覧、および膨張行程後半における燃焼室内残留 UHC 分布を示す。酸素総量が同じでも OEA 層厚さの増加により、メタンスリップは 60% 以上減少し、OEA 予混合気由来する NO 濃度は 12.5% 増加している。また、メタンスリップが燃焼室上隅、ピストン頂面上方のライナ壁面、ピストンキャピティ隅部などから生じていること、OEA 層厚さの増加によって、これらの未燃メタン塊が顕著に減少していることがわかる。以上のように、中型ガスエンジンの燃焼過程を、素反応計算を含む CFD で数値予測して、AQM の効果を確認するとともに、酸素濃度が十分に高ければ OEA 層の拡散が進行しても、その有効性が保持されることを確認した。

表 6 仮想ガスエンジンにおける AQM の効果予測例

OEA layer thickness [mm]	0 (Ref.)	10	15	20
O_2 concentration [vol.%]	(21)	29	27	25
UHC [ppm]	1042	934	978	991
Methane slip [%]	1.85	1.10	1.06	0.71
NO increase [%]	-	3.0	5.4	12.5

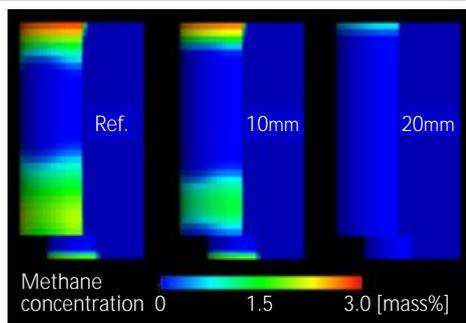


図 9 仮想ガスエンジンに AQM の適用した場合の未燃メタン分布の予測例(@80° CA ATDC)

(4) メタンスリップ低減効果の定容燃焼容器による実証 薄肉円筒隔壁を有する定容燃焼容器では物理的な混合気の成層化が可能であるが、常温下で燃焼を開始するため、初期の火炎伝ば速度が大きく低下する。従って、総括空気過剰率は $\lambda=1.3$ と小さく設定した。表 7 と図 10 は、基準条件である均一予混合気($O_2=21$ vol.%)と、2 種の燃料投入量における AQM 成層混合気($O_2=19/25$ vol.%)の既燃ガス組成、および熱発生過程を比較したもので

ある。装置の調整不足で投入燃料量が変動したものの、均一予混合気と比較して、AQM では未燃メタン量が 25~60% 低減しており、明確な効果が認められる。NO_x 排出量に関しては、OEA による増大と NEA による減少が相殺して大差ないこと、熱発生過程については、AQM の燃焼後半で火炎面が OEA 混合気に到達した後は熱発生率が急増し、結果的に燃焼期間も短縮されていることがわかる。

隔壁付き定容容器の燃焼実験により、理想的な成層化が期待でき、クレヴィス容積の影響を無視可能な条件下では AQM によるメタンスリップ低減が成立することが判明した。

表 7 定容燃焼容器における AQM の効果実測例

	Ref	AQM #1	AQM #2
Methane supply [mol]	0.079	0.086	0.082
UHC [ppm]	3578	1285	2622
CO ₂ [%]	9.15	10.21	9.44
CO [ppm]	211	136	141
NO _x [ppm]	874	718	860

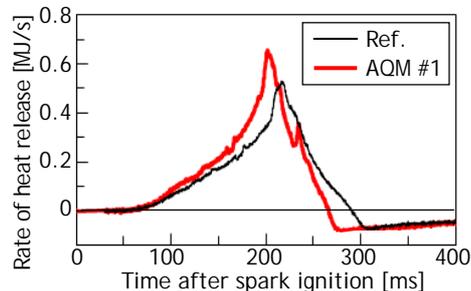


図 10 定容燃焼容器における熱発生過程の比較例

(5) メタンスリップ低減効果の急速圧縮膨張装置による実証 中型ガスエンジンの燃焼室内条件を模擬可能な RCEM により、AQM のメタンスリップ低減効果を最終確認した。図 11 に均一予混合気の酸素濃度を 19, 21, 25 vol. % として、空気過剰率: $\lambda=1.90\sim 3.15$ の範囲のメタンスリップ割合を調べた結果を示す。混合気の希薄化(λ の増加)に伴ってメタンスリップ割合が直線的に増加すること、同一 λ でも混合気中の酸素濃度に応じてメタンスリップ割合が低下することが明らかである。しかしながら、酸素濃度に対する低下傾向は指数的ではなく直線的であり、前項までに得られた傾向とは異なっている。他方、図中に

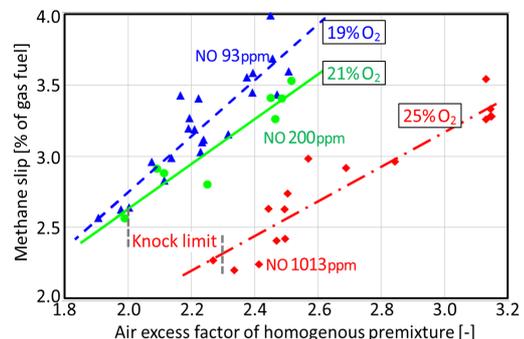


図 11 RCEM における均一予混合燃焼時のメタンスリップ割合と空気過剰率・酸素濃度との関係

記入した $\lambda=2.4$ 近辺の NO 排出量は、混合気の酸素濃度に応じて指数的に増加している。また、垂直の破線は λ でのノック限界であり、標準空気の場合、 λ より小さい λ では安定した運転が困難になることを意味する。なお、装置保護のため、一般的な圧力増加率ではなく、衝撃波に起因する最高圧力付近の筒内圧力の微小振動の有無でノック発生を判定した。表 8 と図 12 は、 $\lambda=2.0$ における均一予混合気(基準条件)と AQM の排出物特性、および同時に計測された筒内圧経過と熱発生過程を比較したものである。 $\lambda=2.0$ は RCEM における均一予混合気のノック限界であるが、比較のため、AQM のノック限界である $\lambda=1.8$ の結果も示した。前項までと異なり、同一 λ で比較した場合、RCEM における AQM のメタンスリップ低減効果は 10% 以下と判定された。圧縮行程中の成層給気の消失が主因と考えられるが、熱発生過程では成層給気を示唆する結果も得られており、検証が必要である。図に示すように、AQM では NEA 側混合気中の軽油噴霧の着火遅れが伸長し、初期燃焼が均一予混合気より緩慢になるが、燃焼後期には OEA 側混合気により最高圧力を抑制したまま機関出力を増大させうることがわかる。結果として λ で 10% 程度低くなるノック限界を AQM の利点と捉え、AQM の実機適用では 10% 程度の高出力化と表に示すように排出率で 25% 強のメタンスリップ低減が期待できるが、NO 排出率は 30% 弱増加する。

以上のように、実機に近い RCEM では、NO_x 排出率が許容される範囲において、AQM によるノック裕度向上を活用した高出力化とメタンスリップ低減とが両立可能である。

表 8 RCEM における AQM の効果実測例

	Ref KL	AQM_λ2	AQM KL
Air excess factor [-]	2.0	←	1.8
UHC [ppm]	3191	2929	2456
CO ₂ [%]	5.37	5.33	5.86
CO [ppm]	1375	1851	1292
NO _x [ppm]	1323	1202	1759

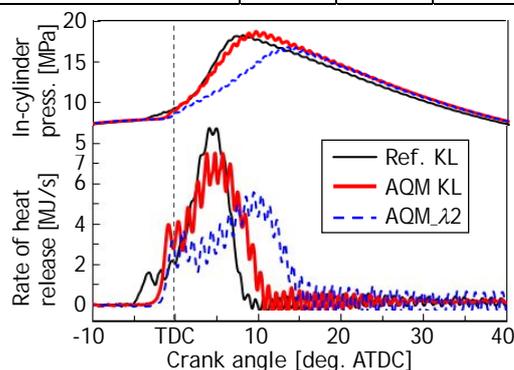


図 12 RCEM における筒内圧経過と熱発生過程の比較

< 引用文献 >

B. Lewis, G. von Elbe, Combustion Flames and Explosions of Gases, 3rd edition, p268, ACADEMIC PRESS, INC.

T. Shudo, K. Shimamura, Y. Nakajima Combustion and emissions in a methane DI stratified charge engine with hydrogen pre-mixing. JSAE Rev 2000; 21: 3-7

H. Ohno, et al., Development of a Nitrogen-enrichment /Humidification Membrane System For NO_x Emission reduction For Marine Diesel Engines, Proc. ISME Kobe, 2011, C6-3.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 16 件)

鶴 大輔, 田島 博士, ディーゼル噴霧間の液滴衝突の数値予測における GPU の適用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 49 巻 6 号, 2014, pp.125-131.

H. Tajima, D. Tsuru, Reduction of Methane Slip from Gas Engines by O₂ Concentration Control using Gas Permeation Membrane, Proc. SAE/KSAE PFL Meeting, 2013, pp.1-8.

H. Tajima, D. Tsuru, Potential Investigation of PCCI Combustion as NO_x Reduction Measure at Low-load Operation with Low-CN LCO Fuel, Proc. CIMAC Congress 13 Shanghai, 2013, pp.1-10.

田島 博士, 船用残さ燃料油の着火・燃焼特性とモデリング, 微粒化, 第 21 巻 72 号, 2012, pp.4-11.

[学会発表](計 38 件)

濱田 拓也, 田島 博士, 気体分離膜を利用した筒内酸素濃度の層状化によるガスエンジンのメタンスリップ低減, 第 52 回燃焼シンポジウム, 2014, 岡山コンベンションセンター.

H. Tajima, Methane slip reduction from natural gas engines by oxygen stratification using gas permeation membrane, THIESEL 2014, Universitat Politècnica de Valencia, Spain.

鶴 大輔, 田島 博士, 気体分離膜を利用した給気内酸素濃度分布によるガスエンジンのメタンスリップ低減, 第 24 回内燃機関シンポジウム, 2013, 神戸大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 博士 (TASHIMA, Hiroshi)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号: 10614620

(2) 研究分担者

高崎 講二 (TAKASAKI, Koji)
九州大学・総合理工学研究院・教授
研究者番号: 30154769

(2) 研究分担者

鶴 大輔 (TSURU, Daisuke)
九州大学・総合理工学研究院・助教
研究者番号: 30154769