

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04868

研究課題名（和文）バイオ燃料利用に関するNOxとメタンスリップの同時低減技術の研究

研究課題名（英文）Study on Simultaneous Reduction Technology of NOx and Methane Slip on Using Biofuel

研究代表者

西尾 澄人（Nishio, Sumito）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・上席研究員

研究者番号：20443244

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地球温暖化に関しては、IMOは温室効果ガス削減の高い目標を設定している。この目標を達成するためにはバイオ燃料が重要な役割を果たすことが期待されており、液体バイオ燃料に加えて、バイオガスや木質ガスから作られるバイオメタンなどの気体バイオ燃料の利用も将来的にはより重要になるだろう。ただし、ガス燃料を使用すると、ガスエンジンでメタンスリップという問題が発生する可能性がある。この問題を解決するために、著者らはエンジンの1気筒内で気体燃料と液体燃料を混合し、気筒から排出される排気ガスをEGRガスとして他の気筒に導入するシステムを提案した。これにより、NOxとメタンスリップの低減を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化対策が重大な課題となっている。バイオ燃料（液体や気体のバイオ燃料）は重要な役割を果たすと言われている。しかしNOxやメタンスリップの問題があり、この問題を解決するために、著者らは1つの機関において、ガス燃料を一部の気筒で使用し、その排ガスを、液体燃料を使用するその他の気筒にEGR用ガスとして導入するシステムを提案した。今回の研究によって、本システムの有効性が確認された。ガス燃焼シリンダーからの排気ガスをディーゼル燃焼シリンダーのEGRガスとして使用すると、メタンスリップが再燃焼され、同時にEGR効果によりディーゼル燃焼のシリンダーから排出されるNOxが低減された。

研究成果の概要（英文）：With regard to global warming, IMO has set high goals for reduction of greenhouse gases. Biofuels are expected to play an important role in achieving this goal, and in addition to liquid biofuels, the use of gaseous biofuels, such as biomethane made from biogas or wood gas, will also become more crucial in the future. However, the use of gaseous fuels can lead to a problem in gas engines - methane slip. To address this issue, the authors proposed a system that makes it possible to mix gas fuel with liquid fuel in one cylinder of the engine and introduce exhaust gas out of the cylinder into all other cylinders as EGR (exhaust gas recirculation) gas. In this way, we have achieved NOx and methane slip reduction.

研究分野：船舶海洋工学関連

キーワード：バイオ燃料 メタンスリップ NOx GHG EGR

1. 研究開始当初の背景

IMOにおいてGHGの厳しい削減が設定された。すでに、IMOのNO_x、SO_x規制に対応しつつ、燃料中の炭素の割合が石油に比べて少なくGHGも削減可能なLNG等の燃料が、実船で使用されつつある。しかしLNG燃料をリーンバーンガスエンジンで使用する場合、未燃のメタンが排ガス中に出てしまうメタンスリップの問題がある。メタンは地球温暖化係数がCO₂の25倍であり、メタンを無害なCO₂とH₂Oに酸化する酸化触媒などの研究はなされているが、未だ有効な方法が見つかっていない。さらに、LNGのみでは将来のGHG削減目標(2030年にCO₂を40%削減)を達成することは不可能であり、カーボンフリーな燃料である水素・アンモニアやカーボンニュートラルな燃料であるバイオ燃料等への転換が有望な対応手段として挙がっている。しかし、これらの燃料が十分に供給される見込みが現時点では立っていないことを考えると、カーボンニュートラルな燃料等を混焼の形で活用することが現実的である。

しかし、水素の場合は高すぎる燃焼速度、アンモニアの場合は着火性の悪さ、あるいはバイオ燃料の場合には含酸素燃料であることに起因するNO_x排出の増加という新たな問題がある。

そこで、本研究では、LNG燃料とバイオ燃料の同時利用を考え、それぞれの燃料使用時の問題点を解決可能なシステムを提案し、そのシステムにおける課題を解決することを目的とする。このシステムでは混焼は行わず、1台のエンジンにリーンバーンのLNG専焼気筒とディーゼル燃焼のバイオ燃料専焼気筒をそれぞれ配置する。このシステムではLNG専焼気筒からのメタンスリップ解消のため、その排ガスを高い燃焼性能を持つバイオ燃料専焼燃気筒に導入する。この排ガスはNO_x低減に有効なEGR(排気再循環)ガスの役割も果たし、バイオ燃料専焼気筒からのNO_x排出を抑制することができる。なお、ディーゼル燃焼により吸気中のメタンを大幅に削減できることは知られているとともに、EGRはすでに効果が確認され実機に搭載されている。

ただし、このシステムでは気筒間の発熱パターンが異なるという、エンジン運転に大きな影響を及ぼす問題が残る。そこで、本研究では実験的に本システムの有効性を検証するとともに、気筒間の発熱状況の違いを吸収可能なシステムの構築を行う。

2. 研究の目的

本研究の目的はガス機関のメタンスリップとディーゼル機関から排出されるNO_xを同時に低減するシステムの構築である。ガス機関とディーゼル機関の2台の機関を組み合わせたシステム構成が一般的であろうが、これを一つの機関で行うところに独自性がある。また、通常異種燃料を使用する場合は混合などを行い、全ての気筒で同じ燃料を使用するのであって、気筒ごとに燃料を変えることはしない。しかし本研究では気筒ごとに燃料を変えて、それぞれの燃焼の長所をいかしたシステムを提案しておりここに特色・独創的な点がある。一方、このようなシステムでは気筒間の燃焼のバラツキによる回転のバラツキや振動という問題が生じる。この問題を解消するため、気筒間の発熱状況の違いを吸収可能なシステムを構築する点に特徴がある。

3. 研究の方法

本研究では、提案するシステムの有効性を確認すると共に、1つのエンジンの気筒ごとに異ならせた燃料を使用して、気筒ごとの燃焼のバラツキを低減して回転ムラや振動を低減するシステムの構築のための研究を実験により行う。これまで、全ての気筒で同じ燃料を使い、気筒ごとの燃焼を同じようにするために、排気温度、最高筒内圧で調整を行ってきた。このため、気筒ごとに燃料を変えたこのようなシステムの実験結果はない。このため、気筒間で発熱量、着火性、燃焼性などが違う異種燃料を使用したエンジン運転において、どれほどの回転ムラ、振動がおこるかといったデータがない。また、気筒ごとに燃焼が大きく異なる場合に、どの程度まで許容されるかといったデータもない状況である。そこで、本研究では下記のように研究を進める。

気筒間で発熱量、着火性、燃焼性などが違う異種燃料を使用したエンジン運転においては、気筒間の燃焼のバラツキが最大の問題である。本研究では、まず燃料性状による気筒間の燃焼のバラツキを実機により検証する。例えば一部の気筒の燃料を他の気筒の燃料(通常は重油)と異なる軽油などの低硫黄液体燃料にできる異種燃料エンジンに改造して実験を行い、気筒間のバラツキの検証を行う。燃焼のバラツキの程度は排気温度、最高筒内圧、図示平均有効圧などにより定量的に評価する。また、一部の気筒の燃焼を他の気筒の燃焼と異ならせていったときに、どの程度まで許容できるかを調べる。

次に一部の気筒の燃料を他の気筒と違うメタンなどのガスの混焼が可能な異種燃料エンジンに改造して上記の実験を行う。上記の実験において、電子制御燃料噴射等を活用し、気筒ごとの燃焼のバラツキを低減するための燃料噴射制御方法を明らかにする。具体的には、燃料噴射時期や燃料噴射パターンを制御して、燃料の着火時期、最高筒内圧、図示平均有効圧、排気温度などを基にどのような制御方法がエンジンの安全運転に有効であるのかを明らかにする。

最後にEGRシステムを構築し、気筒ごとに燃料噴射制御を行い、気筒間の燃焼のバラツキ低減の実証を行う。併せて、排気ガス性状への影響も調べ、提案するシステムの有効性を検証する。本EGRは良好な燃料を使用した気筒の排気ガスを過給機前に戻す低圧EGRによって行う。本シ

ステムで有効性が確認できれば、高圧 EGR にもつなげられると考える。なお、使用するエンジンは 3 気筒の船用機関であり、全気筒燃焼モニタリングが可能な状態である。また、電子制御燃料噴射装置を併用する噴射系は使用可能な状態であり、多様な燃料噴射制御を行い、気筒間の燃焼のバラツキを低減する手法を検討する。

4. 研究成果

研究成果については、口頭発表をするとともに、マリンエンジニアリング学会誌に掲載し、広く公表した(文献 1、文献 2)。実験に使用した機関は 3 気筒の船用中速 4 ストロークディーゼル機関(過給機付き、最大出力 257.4kW / 420rpm、ボア×ストローク：230mm×380mm、松井鉄工所製)である。主な内容は下記のとおりである。

(1) エンジン回転のバラツキについて

3 気筒エンジンの 1 気筒の燃料噴射量を他の気筒の燃料噴射量と異なる噴射量に変更して、気筒間の燃焼のバラツキが回転速度に与える影響を調べる実験を行った。図 1 は通常の A 重油の運転(25%負荷)での筒内圧と回転数で、図 2 は 3 番気筒の燃料噴射量を変更した実験の 1 例である。図 2 の場合、3 番気筒の最高筒内圧はほかの気筒に比べて約 7%低い値であったが、エンジン運転には支障がなかった。図 2 の運転の場合、通常の運転に比べて NOx 濃度は若干低く、CO 濃度は若干高くなる結果であった。

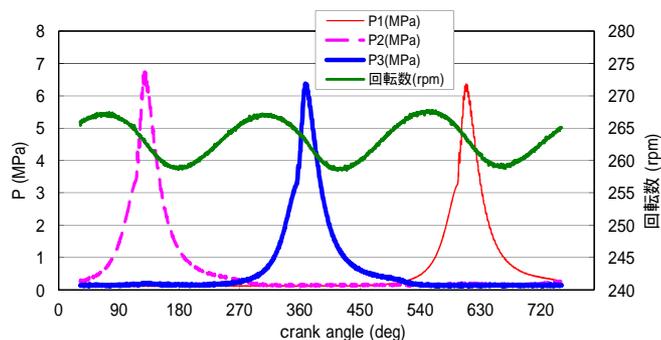


図 1 筒内圧と回転数(25%負荷、全ての気筒の燃料は A 重油)

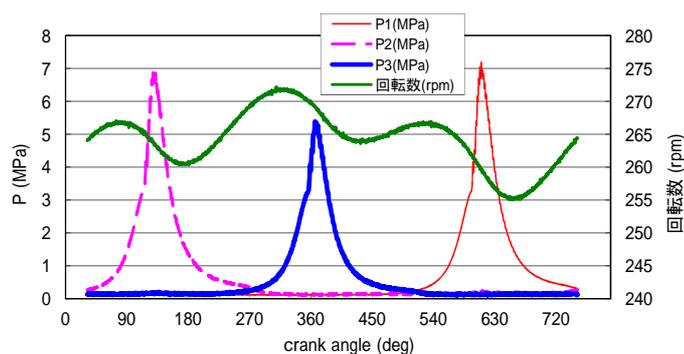


図 2 筒内圧と回転数(25%負荷、全ての気筒は A 重油、3 番気筒の噴射量を変更)

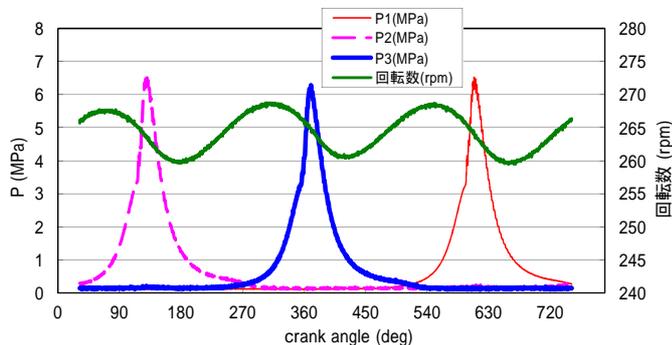


図 3 筒内圧と回転数(25%負荷、3 番気筒は軽油、そのほかの気筒は A 重油)

ここで図 2 の回転数の変化について説明する。2 番気筒が燃焼し、回転数が増加していくところから説明する。回転数は増加していくが、その後、3 番気筒が圧縮行程に入り、回転数の増

加において変曲点がおこり、増加の勾配が小さくなり、その後、減少していく。クランク角度が 360° の少し前で 3 番気筒の燃焼が始まると、回転数の減少において変曲点がおこり減少速度が遅くなっていき、その後増加に転じていく。その後、1 番気筒の圧縮行程が始まり、回転数が減少していくが、1 番気筒の燃焼が始まると、回転数の減少において変曲点がおこり減少速度が遅くなっていき、その後増加に転じていく。

図 3 は 3 番気筒の燃料をほかの気筒の燃料 (A 重油) と異なる軽油に変更して実験を行った結果である (25% 負荷)。NOx 濃度、CO 濃度は若干低いが、ほぼ同等の値であった。結果はおおよそ A 重油の場合とほぼ同等であり、全く問題がなかった。

(2) 提案するシステムについて

実験エンジンは、1 つの気筒がメタンと FAME の混焼ができるように給気枝管に都市ガス 13A (約 90% がメタン) が一定流量で注入されるように加工がしてある (図 4 参照)。また、その気筒から排出されるメタンスリップが生じている排ガスを EGR 用のガスとして利用できるように排気系統が改造されている (図 4 参照)。

3 気筒エンジンの 1 気筒でメタンと FAME の混焼を行うエンジン実験 (実験) と、さらにその気筒のメタンを含む排ガスの約 50% を EGR 用の排ガスとして利用 (EGR に使われる排ガスは全体の排ガスの約 15%) するエンジン実験 (実験) を行った結果 (図 5 参照) 次のことが分かった。

- 1) 提案するシステムにより NOx とメタンスリップの同時低減効果を確認した。
- 2) NOx 濃度は EGR を行うことにより約 12% 低減した。EGR により排ガス量が約 15% 減ることを考慮すると約 25% の削減となる。
- 3) 排ガス中のメタン濃度は EGR を行うことにより約 40% 低減した。EGR で排ガス量が減ることを考慮すると約 49% の削減となる。

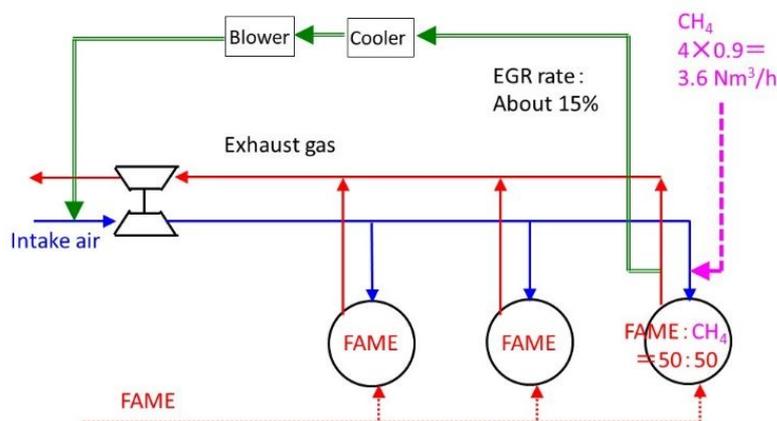


図 4 1 気筒がメタンの混焼で、その排ガスを EGR 用のガスとして利用した実験

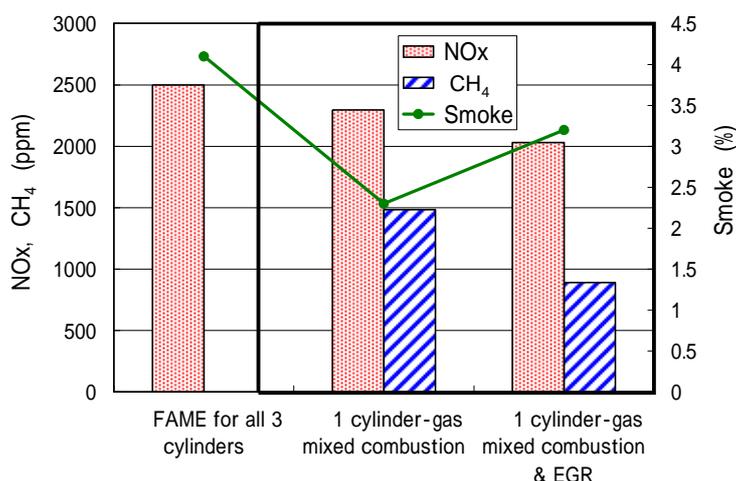


図 5 排ガスに与える影響 (エンジン負荷 25%)

引用文献

- 文献 1 西尾澄人、バイオ燃料の有効利用、マリンエンジニアリング学会誌、第 56 巻第 4 号、2021、618-623
- 文献 2 西尾澄人、仁木洋一、市川泰久、バイオ燃料利用に関する NOx とメタンスリップの同時低減技術の研究、マリンエンジニアリング学会誌、第 58 巻第 6 号、2023、889-894

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 西尾澄人, 仁木洋一, 市川泰久	4. 巻 58巻6号
2. 論文標題 バイオ燃料利用に関するNOxとメタンスリップの同時低減技術の研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本マリンエンジニアリング学会誌	6. 最初と最後の頁 889-894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5988/jime.58.889	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西尾澄人	4. 巻 56巻4号
2. 論文標題 バイオ燃料の有効利用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本マリンエンジニアリング学会誌	6. 最初と最後の頁 618-623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5988/jime.56.618	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西尾澄人, 仁木洋一, 市川泰久
2. 発表標題 バイオ燃料利用に関するNOxとメタンスリップの同時低減技術の研究
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西尾澄人
2. 発表標題 バイオ燃料利用に関するNOxとメタンスリップの同時低減技術の研究
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------