

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360435

研究課題名（和文） 近接2重燃料弁を用いた船用ディーゼル機関の低負荷域におけるNOx低減

研究課題名（英文） NOx Reduction from Marine Diesels under Lower-load Conditions via Utilization of Closely-aligned Double-needle Injector

研究代表者

田島 博士 (TAJIMA HIROSHI)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70179688

研究成果の概要（和文）：NOx 排出率の大幅低減と低硫黄燃料への移行が必要な船用ディーゼル機関において、排気再循環や選択触媒還元等の既存技術では低減が困難な低負荷域でのNOxとPMの排出を、低硫黄で着火性に劣る分解軽油のPCCI燃焼を適用することで同時低減するという方策を、近接2重燃料弁の噴霧重合による混合気の成層化促進とピストンへの燃料付着防止、燃料のエマルジョン化による自着火時期の遅延制御を組み合わせることで実証した。

研究成果の概要（英文）：A novel approach, which utilizes the PCCI combustion of Light Cycle Oil (LCO) of low-cetane number and low-sulfur content, is proposed to overcome the antipollution difficulties in large marine diesels especially under lower-load conditions where the conventional measures such as EGR or SCR are hard to be effective. Direction control of spray propagation was introduced via merging sprays from a closely-aligned double-needle injector to avoid wall wetting and to promote mixture stratification. Also thanks to water emulsification of LCO lengthening the ignition delay, practical and economical solution against air pollution in marine sector is within reach for the first time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶工学，大気汚染防止・浄化，熱工学，ディーゼルエンジン，PCCI燃焼

1. 研究開始当初の背景

(1) 国際海事機構の定める船舶のNOx排出率規制は2016年から規制海域で1次規制値の80%減という苛酷なものであり、さらに2015年から船用燃料にも含有率0.1 mass%以下の低硫黄化が義務付けられている。

(2) 10 ppm以下の超低硫黄化は価格と供給能力から論外であり、余剰傾向にある分解軽

油；Light cycle oil (LCO)の転用が想定されるが、LCOは芳香族性が高く着火性に劣った低質なディーゼル燃料である。

(3) 我が国は船用燃料の確保と海洋環境の保全という両立困難な課題に直面しており、官民一体でSCR（選択的触媒還元）の開発が進められているが、外航船舶が搭載する2ストローク機関では低負荷時の排温不足による

還元率低下と酸性硫酸の生成、燃焼悪化に起因したPMによる触媒閉塞が実用化を阻んでいる。欧州の主要エンジン製造社で開発中のEGR（排気再循環）でも硫酸腐食は無論のこと、還流も含めた低負荷時のポンプ仕事が過大となるなどの問題点を克服できていない。

(4) 従って、大型船用ディーゼル機関の低負荷時におけるNOxとPMの低減に特化し、後処理や後付装置によらない有効な方策を確立するための研究が強く求められている。

2. 研究の目的

(1) 接触分解の留出分であるLCOが軽質かつ低セタン価なことを逆利用し、船用機関では既往例が無いPCCI燃焼を導入して、安価な低硫黄燃料を利用しつつ後処理なしで低負荷時のNOxとPMの同時低減を実現する。

(2) ピストン頂面への燃料付着を回避しつつ効率的な混合気の形成を図るため、近接2重針弁からの噴霧の重合を利用した噴霧伝ば方向の能動制御が可能な噴射システムを初めて導入し、その効果を実証する。

(3) PCCI燃焼で混合気の自着火時期を制御するため、LCOのエマルジョン化の効果を確認するとともに、NOx規制値がオンロードのディーゼルよりは寛大であることから、2段噴射による負荷増大の可能性を検証する。

(4) 近接噴霧の重合過程とLCOのPCCI燃焼過程および水エマルジョン燃料の着火・燃焼特性の数値予測を実現するため、公開エンジン用CFDコード：KIVA3を対象とした新たな噴霧液滴衝突モデルおよびエマルジョン燃料モデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) LCOの噴霧拡散燃焼における着火・燃焼特性を定容容器や急速圧縮膨張装置(RCEM: Rapid Compression Expansion Machine)を用いた燃焼可視化実験により把握する。

(2) 近接2重燃料弁と噴射率の時間的制御が可能な噴射システムを製作し、可視化定容容器やRCEMを用いて重合噴霧の伝ば方向が能動的に制御できることを確認する。

(3) RCEMで噴射方向固定のディーゼル燃焼とPCCI燃焼、および噴霧重合で伝ば方向を可変制御したPCCI燃焼を行い、LCOへの燃料変更、噴霧重合とエマルジョン化の効果を燃焼経過や排出物特性で定量的に検証する。

(4) 不輝炎や噴霧の液相部を検出可能なシャドウグラフと背景散乱光の撮影光学系を用いてPCCIの着火・燃焼過程を詳細に観察することにより、各因子の最適化指針を得る。

(5) 研究代表者らが構築した油水液滴間の衝突を再現する液滴モデルを重合噴霧にも拡張適用して、その伝ば挙動を数値予測するとともに、油水同心球でエマルジョン燃料の模擬が可能であるかを検証する。

4. 研究成果

(1) 図1に本研究で開発した近接2重燃料弁とRCEM（ボアφ240 mm×ストローク 260 mm）への搭載状況を示す。燃料弁は、Wärtsilä社の直接水噴射用燃料弁に類似した構造であるが、一方のサック容積を斜方配置して噴孔をより近接させていること、重合の俯角方向に関して両噴孔を対称に配置していることを特徴とする。本研究は重合噴霧の伝ば観察を主目的としたため、各針弁から単一の噴孔を通じて噴霧を重合させた。以下では、前高後低の噴射圧を与える針弁を”Pilot”，前低後高の側を”Main”と称する。

図2に噴射装置の概要を示す。噴射率の可変制御は、圧力増倍型コモンレール噴射装置の一次側噴射圧を調節するリニアサーボバルブ（Yuken Kogyo LSVG-03）のスプールバルブ駆動電圧を図のように調節することで実現した。Pilot燃料弁側には正負に振動し、電圧が異なる2段の puls 電圧を印加することで前高後低形の噴射率を与えている。

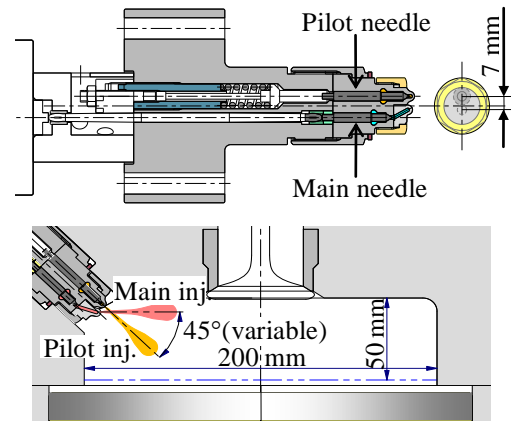


図1 PCCI燃焼用近接2重燃料弁の断面および急速圧縮膨張装置への搭載状況

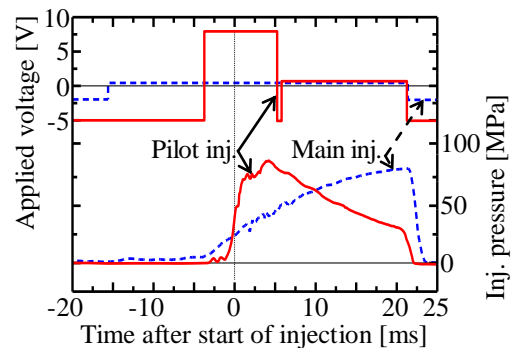
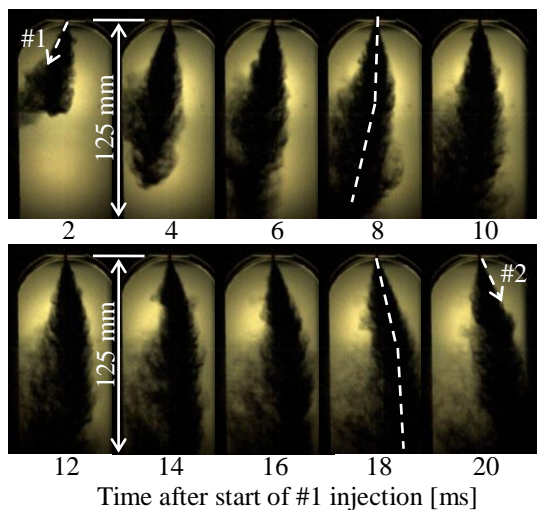


図2 各燃料弁に与えるリニアサーボバルブ駆動電圧と得られる噴射圧波形の例

(2) 図3は定容容器（φ150 mm×高 370 mm）を用いて、近接2重燃料弁による噴霧方向の能動制御を常温・2.5 MPaの窒素雰囲気下のBDL画像で確認した例である。図中、#1と

記した Pilot 燃料弁が容器中心軸から左方向に 25°, #2 と記した Main 燃料弁が右方向に 25° 傾いており、重合角は 50° である。図から、噴射開始直後と終了直前の単独の噴霧伝ばを除いた噴霧重合の発生と、噴射率制御による噴霧伝ば方向の反時計回りの変化が明らかである。伝ば方向以外の重合噴霧の特徴として、噴霧先端と根本で伝ば方向に時間的な差があること（図中の点線）、噴霧が常時移動するため噴霧核が形成されず過濃混合気の形成が抑制されることも指摘できる。

以上から、従来は固定された噴射軸上の多段噴射程度であった噴霧分散の自由度が、近接 2 重燃料弁と噴射率制御を組み合わせることで大幅に拡張できることが実証された。

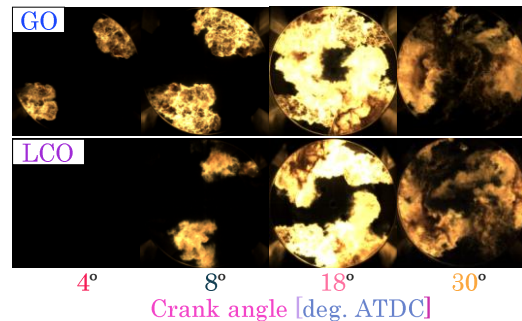


VCVC, BDL image
Ambient cond. (Nitrogen, 2.5MPa, 300K)
Inj. cond. #1: ($\phi 0.23\text{mm}$, 20ms, 115°, decreasing)
Inj. cond. #2: ($\phi 0.23\text{mm}$, 20ms, 65°, increasing)

図 3 噴射率による近接 2 重燃料弁からの重合噴霧の伝ば方向制御の実例

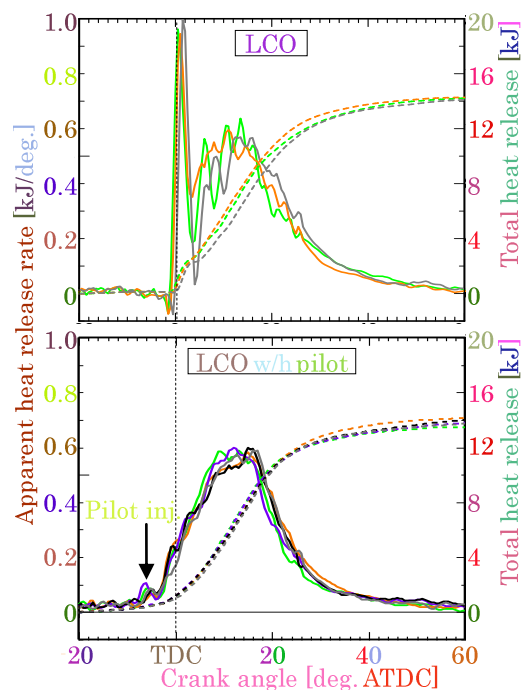
(3) 図 4 は PCCI 燃焼実験に先立ち、可視化実験エンジン（ボア $\phi 190\text{ mm}$ × ストローク 350 mm ）実施した噴霧拡散燃焼での LCO（セタン価 23, 芳香族含有率 71%）の着火・燃焼特性の調査例である。低負荷時の専焼を想定し、側方噴射の 4 孔燃料弁を 2 本装着している。LCO の輝炎出現時期は軽油（GO, セタン価 71, 芳香族含有率 21%）より 5°CA 遅角し、輝炎の出現も同時期の軽油の噴霧火炎の先端に一致する位置まで後退する。輝炎体積は軽油より小さい傾向を示すが、噴霧中央部にはより高輝度（高温）であり、他試験エンジンで低負荷の NO_x 排出量が 50% 程度増加し、燃焼室各部の内壁面が 10 °C 以上昇温するのを確認している。このように気化特性は良好であるが、LCO を船用 LSFO として既存のディーゼル燃料を置換するには着火遅れや放射伝熱に起因する課題が多い。

図 5 は燃料弁を一本の近接 2 重燃料弁に換装し、単孔の Pilot 弁と Main 弁から燃焼室中央に向けほぼ同軸上に燃料が噴射されるように俯角を設定し、Pilot 弁から質量比 3% の先行噴射を行うことで LCO の燃焼改善を図った例である。このように、近接 2 重燃料弁では噴孔口金部の交換だけで先行噴射や多段噴射の模擬が可能である。先行噴射により図に示されている軽油と同等の燃焼経過が得られた。その後、海上技術安全研究所からも追認の研究結果が報告されている。



Visual test engine (NDT19/35)
Run. cond.: 350~400rpm, Scav. press. 0.17MPa (GO), 0.18MPa (LCO)
Inj. cond.: $\phi 0.23\text{mm} \times 4 \times 2$, 66MPa, 3~12°ATDC

図 4 可視化実験エンジンにおける LCO と軽油の拡散噴霧燃焼過程の比較

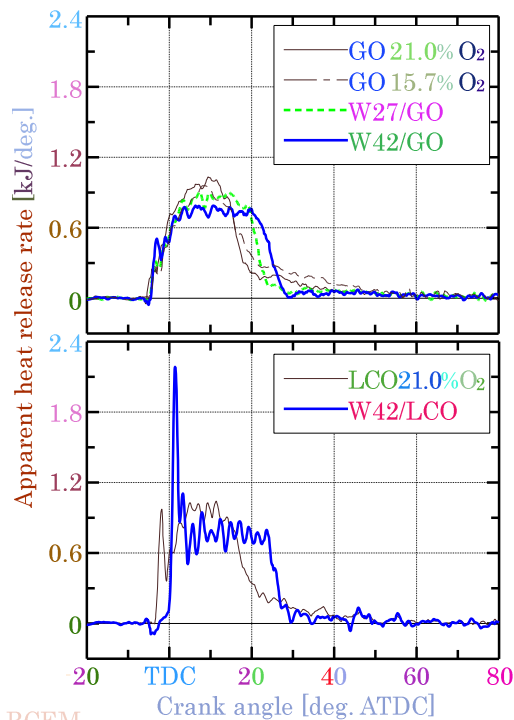


Visual test engine (NDT19/35)
Run. cond.: 350~400rpm, Scav. press. 0.18MPa
Inj. cond.: $\phi 0.18\text{mm} \times 1$, 40MPa, 16~9°ATDC
 $\phi 0.45\text{mm} \times 1$, 80MPa, 5~15°ATDC

図 5 模擬パイロット噴射による LCO の燃焼改善の例

(4) 図6はRCEMで燃料のエマルジョン化による着火時期の遅延制御の可能性を検証した結果を示している。RCEMの視野範囲の制約、エマルジョン燃料の噴霧モデルの構築、および異常燃焼による機器破損の危険性を考慮して、先ず噴霧の拡散燃焼の観察から開始した。燃料は、軽油とLCO、および両者の42%エマルジョン燃料（以下、W42/LCOのように記述）とし、PCCI燃焼への適用を念頭に少噴射量の噴射条件を選択した。また、MAN社が船用2 stroke 機関に適用を検討しているEGRを模擬するため、酸素濃度15.7%の人工空気を用いた計測も実施した。

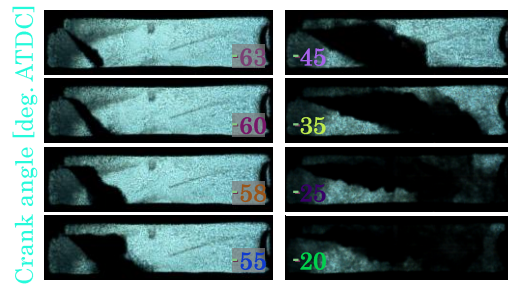
図より、軽油ではエマルジョン化や酸素濃度の低下による着火時期の遅延はほとんど認められないのに対し、LCOも酸素濃度低下では同様であるが、エマルジョン化の場合には着火遅れが顕著に伸長することがわかる。従って、LCOのエマルジョン化によるPCCI燃焼の着火時期制御の可能性が示唆された。



RCEM
Running cond.: 350rpm, Tank press.0.7MPa
Inj. cond.: ϕ 0.5mm \times 1, 150MPa,
Neat 5~15°ATDC, W42 5~22°ATDC

図6 エマルジョン化がLCOと軽油の噴霧燃焼に与える影響の比較例

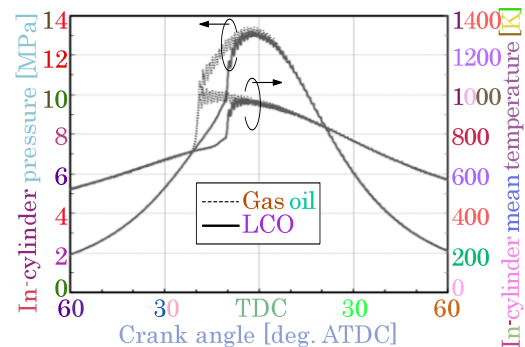
(5) 図7は軽油PCCI燃焼の重合噴霧の伝ば過程をシャドウグラフ撮影したものである。噴射開始直後はPilot噴霧が単独で伝ばするが、Main噴霧の噴射によって重合噴霧が形成されると、全体の俯角が減少して噴射終了時にはほぼ水平となっていることがわかる。従って、本研究で意図したピストンとの衝突を回避した噴射方向制御が可能である。



RCEM, Initial ambient cond. (0.7MPa, 353K)
Running cond.: 350rpm
Pilot: ϕ 0.23mm \times 1, 82 MPa_{max}, 64~22°ATDC
Main: ϕ 0.32mm \times 1, 73 MPa_{max}, 60~-20°ATDC

図7 RCEMにおける軽油重合噴霧燃焼のシャドウグラフ撮影例

(6) 図8はRCEMで噴霧重合によるPCCI燃焼の時間経過を軽油とLCOで比較したものである。燃料種による予混合気の着火時期の変化を強調するため、上死点前にPCCIで典型的なノッキング様の急峻な圧力上昇が生じるよう、以降の条件より圧縮比を高く設定した。軽油が-23.5°ATDCから自着火による急峻な圧力上昇を発生するのに対し、LCOでは2段階の熱発生を経ること、最初の熱発生が10°CA弱遅延していることがわかる。具体的には、-14°ATDC付近で低温酸化反応(LTO)による緩やかな圧力・温度上昇を示した後、-11°ATDCで熱炎が発生している。

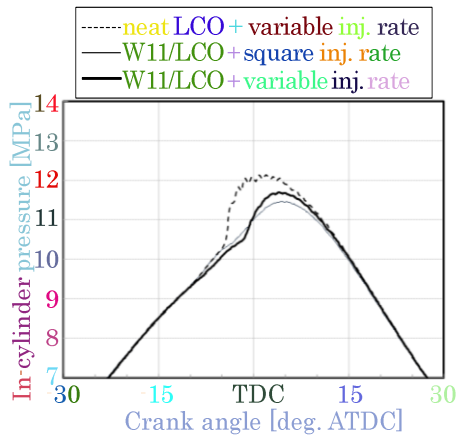


RCEM, Initial ambient cond. (0.5MPa, 353K)
Compression ratio: 9.54
Inj. conditions same as Fig. 7

図8 燃料種がPCCI燃焼の着火遅れに与える影響

(7) 図9は圧縮比を標準値に戻してLCOのエマルジョン化による着火時期の遅延効果と、噴射方向の可変制御の効果を調査した結果を示している。圧縮比の低下によりLCO単味の噴霧もLTOと熱炎の発生時期が-10.5°ATDC, -4.5°ATDCまで後退し、両者の間隔が拡大している。PCCI燃焼では拡散燃焼時よりもエマルジョン化の影響が明確であり、11%の水添加でも十分な着火時期の遅延効果が得られた。具体的にはLTOに関する変化は小さいものの、熱炎の発生時期が

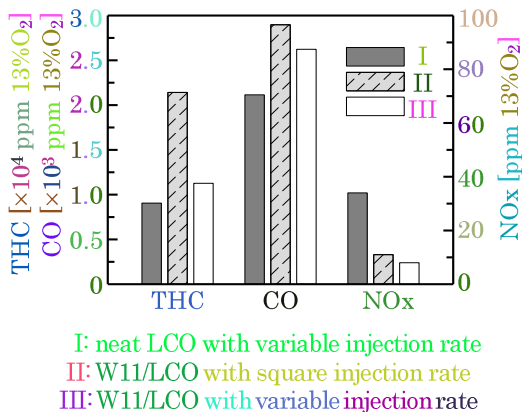
固定噴射角の場合で -3°ATDC 、可変噴射角の場合で -2°ATDC 程度まで遅延し、予混合燃焼として正常範囲の圧力経過が得られている。また、同じW11/LCOを用いながら時間的に一定の噴射率を与えて噴射方向を固定した場合と、噴射方向をピストン上昇に合わせて変化させた場合とを比較すると、後者の方が上死点以前の熱発生量が抑制され、上死点後に迎える最高圧力値が増加しており、効率の良い燃焼が得られていることがわかる。



RCEM, Initial ambient cond. (0.5MPa, 353K)
Compression ratio: 9.54

図9 噴射方向の可変制御とエマルション化がLCOのPCCI燃焼に及ぼす影響

(8) 図10は前図の各噴霧条件におけるPCCI燃焼の排出物特性を比較したものである。上死点以前に燃焼が終了するLCO単味の噴霧では長く高温に保持される領域が多いためW11/LCOの噴霧に比べて、3倍以上NO_xの排出量が多くなっている。W11/LCOの噴霧同士の場合では、噴霧伝ば方向を可変制御した場合の方が、伝ば方向を固定した場合に比べTHC、COの排出量が減少しており、燃料の壁面付着の削減と予混合化の促進に関して所期の効果が得られていることがわかる。



I: neat LCO with variable injection rate
II: W11/LCO with square injection rate
III: W11/LCO with variable injection rate

図10 噴射方向の可変制御とエマルション化がPCCI燃焼の排出物に及ぼす影響

(9) 図11は本研究で開発した噴霧衝突モデルにより、重合噴霧の伝ば方向変化を数値的に再現した例である。この噴霧モデルは、噴霧液滴の衝突発生を軌道計算により厳密に判定するNordinモデルとパーセルの概念を用いる離散液滴モデルとの整合を取るための独自補正を加えた修正Nordinモデルと、直接水噴射用に研究代表者らが開発した油水衝突モデル(液滴に衝突結果を従来の2種から4種に細分するモデル)を簡略化したモデルを組み合わせたものである。図より、噴霧先端部の形状など、噴霧形状の細部についての再現性に問題はあるものの、重合噴霧の到達距離や伝ば方向については妥当な予測結果を与えていることがわかる。

図12は前図の重合噴霧と、俯角を 45° 、 10° に固定した $\phi 0.4\text{ mm}$ の単一噴孔からの噴霧の予混合気形成を予測した結果である。いずれの条件も -17°ATDC 付近で着火を生じて

RCEM, Initial ambient cond. (0.81MPa, 353K)
Compression ratio: 9.08

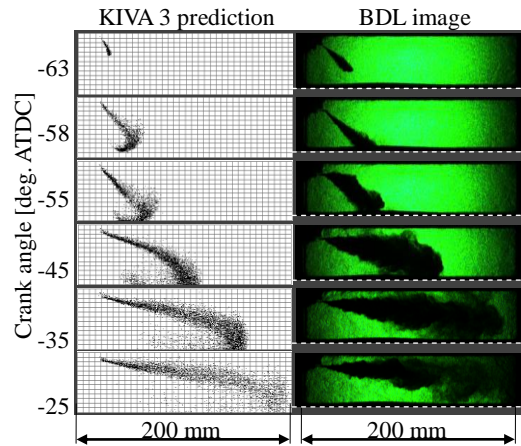


図10 重合噴霧の伝ば挙動に基づく液滴衝突モデルの検証例

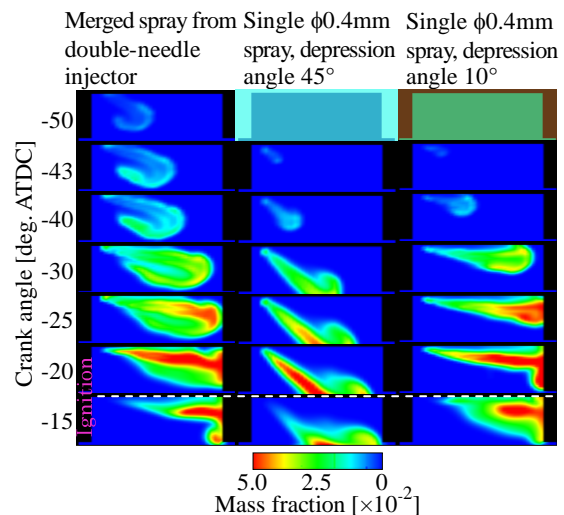


図11 噴霧伝ば方向の可変制御がLCO蒸気濃度分布に与える影響の予測

いる。図より、重合噴霧は単一噴霧よりも着火までの混合気形成が促進されるとともに、着火時にはより多くの予混合気が消費されていることがわかる。なお、申請時に計画していた詳細化学反応に基づく燃焼予測は、LCOの主成分をなす2環芳香族に関して信頼にたる反応スキームが未確立であることが判明したため、実施を見合わせている。

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 24 件)

- ① H. Kato, H. Tajima, et al., Approach of spray distribution control using two merging sprays of different injection rate for PCCI combustion, 査読有, Proc. 24th ILASS Europa, 2011, pp.1193_1-10.
- ② K. Okazaki, K. Takasaki, Y. Abumiya, Experimental and Numerical Study on Spray Combustion Applying High Injection Pressure by EFI, 査読有, Proc. 9th ISME KOBE, pp.C7-4_1-4 (2011).
- ③ K. Okazaki, K. Takasaki, H. Tajima, et al., Effects of Electronically Controlled Fuel Injection System (EFI) for Marine Diesel Engines, 査読有, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 45(増刊号), 38-43 (2010).
- ④ D. Tsuru, H. Tajima, et al., Droplet Collision Modeling between Merging Immiscible Sprays in Direct Water Injection System, 査読有, Proc. 23rd ILASS Europa, pp.154_1-10 (2010).
- ⑤ D. Tsuru, S. Kawauchi, K. Okazaki, H. Tajima, Spray Collision Modelling of Immiscible Droplets in Direct Water Injection, 査読有, Proc. 11th ICLASS, pp.MSM_1-6 (2009).
- ⑥ 田島 博士, 他 3 名, 燃料液滴と水液滴の衝突を考慮した独立水噴射方式ディーゼル機関における噴霧液滴挙動の数値予測 - 第一報: 油水衝突の有無と合体後の蒸発特性が噴霧伝ばに与える影響, 査読有, 日マリンエンジニアリング学会誌, 44(3), 73-78 (2009).

[学会発表] (計 32 件)

- ① 田島 博士, 他 3 名, 大型ディーゼル機関の噴霧燃焼と NOx 排出率に与える給気酸素濃度と水噴射の影響, 第 49 回燃焼シンポジウム, 横浜市, 2011.12.05-07.
- ② H. Tajima, S. Kawauchi, et al., Effects of Oxygen Dilution of Charged Air on Combustion and NOx Emission of Low-Speed Diesel Engines, 9th ISME

KOBE 2011, Kobe, Japan, 2011.10.17-21.

- ③ D. Tsuru, S. Kawauchi, R. Ishibashi, H. Tajima, Investigation of droplet collision behavior inside merging fuel sprays for PCCI combustion 14th ILASS-Asia, Jeju, Korea, 2010.10.21-22.
- ④ Daniel Struckmeier, Hiroshi Tajima, Daisuke Tsuru, New Application and Modeling of Low Ignitability Fuel for Marine Engines, the 26th CIMAC World Congress on Combustion Engines, Bergen, Norway, 2010.06.14-17.
- ⑤ 高崎 講二, 田島 博士, 岡崎 航介, 川内 智詞, 燃費とのトレードオフを最小とする NOx 低減策の実験的・理論的検討 (燃料・水エマルジョンとミラーサイクル), 第 79 回 (平成 21 年秋季) マリンエンジニアリング学術講演会, 広島市, 2009.09.16-18.
- ⑥ D. Tsuru, S. Kawauchi, K. Okazaki, H. Tajima, Spray Collision Modelling of Immiscible Droplets in Direct Water Injection, 11th ICLASS, Vail, USA, 2009.07.26-30.

[図書] (計 2 件)

- ① Koji Takasaki, Verbrennung von hoch aromatischem Destillatkraftstoff mit geringem Schwefelanteil – Ein Schritt zur Minderung der SOx-Emissionen von Schiffen, Die Zukunft der Großmotoren, HAUS DER TECHNIK, Aachen, 2010, pp.285-305.

[その他]

本研究に関わる論文について、日本マリンエンジニアリング学会 ロイドレジスターマンソン賞 (2010 年度) と ILASS-Europe 2010 優秀論文賞を受賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 博士 (TAJIMA HIROSHI)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号: 70179688

(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