

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22360091

研究課題名(和文) 燃料設計手法による混合気制御・燃料着火制御併用型低エミッション噴霧燃焼法の開発

研究課題名(英文) Fuel design approach for artificial control of spray combustion process

研究代表者

千田 二郎 (Senda, Jiro)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：30226691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：ディーゼル燃焼場での非定常噴霧燃焼過程を人為的に制御することを目的とした。具体的には、二成分の混合燃料を用いて、その混合割合などを変化させて、混合気濃度の時間的・空間的分布を制御して、燃焼火炎および高温燃焼反応領域のラジカル化学種の発光域の特性を変化させて、噴霧火炎性状を変化させて、燃焼効率の変化を明確化した。さらに、これらの混合気濃度分布と燃焼特性の関係を体系的に整理した。

研究成果の概要(英文)：The objective of the study is to control the spray combustion process in Diesel engines. The burning flame characteristics can be changed through the temporal and spatial mixture concentration by using the two component fuel. And the relation between the mixture concentration field and combustion process was revealed.

研究分野：熱工学

キーワード：ディーゼル機関 非定常噴霧燃焼 多成分燃料 燃焼制御 熱損失低減 熱効率向上

1. 研究開始当初の背景

有限な化石資源を有効に活用するため内燃機関において更なる熱効率向上が求められている。そこで、熱効率に優れるディーゼル機関が注目されている。しかし、ディーゼル燃焼では燃料直接噴射方式をとるため、化学量論比付近の高温領域において窒素酸化物、燃料過濃領域では粒子状物質がそれぞれ生成され、両排気成分はトレード・オフの関係で同時低減は困難である。そのため燃料噴射時期の早期化により、混合気の予混合化を促進したディーゼル燃焼の低エミッション化が試みられてきた。しかしながら、予混合化を促進したディーゼル燃焼は高負荷領域における急峻な圧力上昇が問題となっており、運転可能領域が制限されてしまう。よって本研究の開始時点では、燃焼室内の混合気濃度分布の空間的な制御によって、低エミッションかつ緩慢な燃焼の運転領域の探索研究が多数行われていた。

本研究では各種の混合燃料を用いた噴霧の微粒化・蒸発・混合気形成過程の制御手法に関する提案を「燃料設計手法」として研究してきた。1995年より液化CO₂とノルマルトリデカンの混合燃料を用いてディーゼル燃焼相当場で噴霧・燃焼過程の人為的制御を行ないPM濃度、NO_x濃度の同時低減を、図示熱効率を改善した状況下で達成した(千田他, 1997)。さらにその後、ノルマルペンタンC₅H₁₂(以下:nC₅)とノルマルトリデカンC₁₃H₂₈(以下:nC₁₃)の混合燃料を用いて、ガソリン燃焼とディーゼル燃焼の区別にとらわれない両者融合型の燃焼モード実現に向けた基礎研究を公表した(千田他, 2000)。ここでは、気液平衡理論に基づいた圧力-温度線図上の二相領域の解析結果を踏まえた相変化過程の計算を行ない、基本コンセプトとしての低沸点燃料であるノルマルペンタンが高沸点燃料であるノルマル

トリデカンの蒸発を促進させ、同時に高自着火性成分であるノルマルトリデカンが低自着火性成分であるノルマルペンタンの着火を助長する、という相互補完性能の実現による最適な燃焼法の確立を目指した。筆者らの提案はこのように、燃料自体を主体としたガソリン燃焼とディーゼル燃焼の融合化に関わるものである。

2. 研究の目的

非定常噴霧燃焼場であるディーゼル燃焼過程において、その噴霧の蒸発、混合気形成、さらに着火・燃焼の諸過程を人為的に制御して、燃焼効率を向上させて同時に低エミッション化を図ることを目的としている。このコンセプトは従来にない全く新規のアプローチであり、燃料主体の燃焼制御手法である。この実現のため、本研究では燃料の物理的・化学的性質を利用し、噴霧制御を可能とする燃料設計手法を提案している。

過去の研究において、沸点の異なる燃料を混合することで各成分は蒸気形成速度の差により噴霧中で空間的に異なる濃度で分布することを明らかにした。また、多成分燃料噴霧内における各成分の蒸気分布から高自着火性成分が着火性の支配因子であることを示した。そして、着火制御および時間・空間的な燃焼進行度の離散化が行なわれ、噴霧形状の人為的な制御の可能性を示唆した。このことを利用して、均一度の高い予混合気の圧縮着火燃焼による急激な燃焼を抑えて高負荷領域において噴霧拡散燃焼を主体としたさらなる低エミッション燃焼法の確立が期待できる。

以上のことを受け、本研究ではこれまでの多成分混合燃料における噴霧燃焼過程に関する知見を勘案し、着火後の噴霧火炎形態の制御手法を探求した。そこで本研究では火炎と燃焼室壁面の干渉を回避し、熱損失を低減することが可能であるコンパクト

トな火炎形態の把握を目的とした。

また過去の研究では、減圧沸騰を燃料設計手法に適用することにより燃料の蒸発を促進し、噴霧が分散することを確認した。そのため低貫徹力かつ高分散を有するコンパクトな噴霧火炎形状を実現することが期待できる。

3. 研究の方法

二成分混合燃料を用いた噴霧火炎構造における制御の可能性を検証した。そこで、噴霧火炎構造を把握するため、背景光撮影、定容燃焼容器を用いてシャドウグラフ撮影、化学種自発光計測および輝炎の撮影を行なった。また撮影画像を基にアスペクト比解析、フラクタル次元解析およびソーベルフィルター解析を行ない、火炎構造の定量的解析を行なった。

具体的には、下記の手法によった。

・コンパクト噴霧火炎の実現

ディーゼル燃焼では火炎の壁面への衝突点において熱損失が最も大きくなると考えられるため、火炎の壁面衝突を回避することが求められる。そのため燃焼室壁面との干渉を回避するコンパクト噴霧火炎形成によるコンパクトな高温燃焼領域の実現が必要であり、高分散・低貫徹噴霧の実現によりコンパクト噴霧火炎を形成した。

・火炎外縁・高温燃焼領域外縁のスムーズ化

壁面との衝突を回避できない長い噴霧先端到達距離の場合において火炎内部における乱れの抑制して壁面への熱伝達を低減する必要がある。火炎外縁・高温燃焼領域外縁における乱れの抑制によりレイノルズ数が低下し、熱伝達率を低減させることが考えられる。本研究では火炎外縁・高温燃焼領域外縁のスムーズ化を調査するためOHラジカルおよび輝炎画像を基にその外縁に対してフラクタル次元解析を行ない、凹

凸度・シワ度を定量的に評価した。

・火炎内燃料温度の低温化と均一性向上
壁面との衝突を回避できない場合において、燃料の噴射開始から噴霧の急速蒸気化による比較的希薄な混合気形成を通しての低温火炎の実現による熱損失低減が考えられる。加えて、低温燃焼により比熱比 κ が増加し、理論熱効率の向上に貢献すると考えられる。また噴霧火炎と燃焼室壁面との接触が回避できない場合、接触部においてのみ乱れが少なく、低温燃焼部分のみの接触を許容する方向性、すなわち高温燃焼領域部分の壁面接触の低減を図ることも重要である。

4. 研究成果

二成分の混合燃料を用いて、その混合割合などを変化させて、混合気濃度の時間的・空間的分布を制御して、燃焼火炎および高温燃焼反応領域のラジカル化学種の発光域の特性を変化させて、噴霧火炎性状を変化させて、燃焼効率の変化を明確化した。さらに、これらの混合気濃度分布と燃焼特性の関係を体系的に整理した。

具体的な結論は以下のようである。

- (1) 全実験条件において、HCHO および OH ラジカルの発現時期、着火位置および蒸気相長さは着火遅れ期間に依存している。
- (2) 蒸気相長さに対する着火位置は着火遅れ期間の長い条件において低沸点成分および高沸点成分の空間的な成分分離が行なわれるため、噴霧先端側に移行する。しかし、低沸点成分の混合割合を変化させた際においては、着火遅れ期間の変化量は小さく、空間的な成分分離が行なわれる前に着火するため、ほぼ一定となる。
- (3) 輝炎形状は着火遅れ期間が長期化する条件において、噴霧全体が噴霧下流側に移行し噴霧が拡散するため、輝炎は半径

方向に広がる。

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 28 件)

1. 種々の二成分混合燃料を用いたディーゼル燃焼における着火および火炎構造に関する研究
味岡将士, 向山智之, 宮田哲次, 桑原悠, 小橋好充(金沢工大), 桑原一成(大阪工大), 松村恵理子, 千田二郎
自動車技術会論文集, Vol.46, No.2, pp.349-354, 2015-3 (査読有)
2. Effect of breakup model on large-eddy simulation of diesel spray evolution under high back pressures
Koji Kitaguchi, Tatsunori Fujii, Soichi Hatori, Tsukasa Hori (Osaka University) and Jiro Senda
International J of Engine Research, Vol. 15(5) 522-538, 2014-6 (査読有)
3. Development of Breakup Model for Large Eddy Simulation of Diesel Spray
Tatsunori Fujii, Koji Kitaguchi, Soichi Hatori, Tsukasa Hori and Jiro Senda
Journal of Energy and Power Engineering 7, pp.2312-2320, 2013-12 (査読有)
4. SPRAY VAPORIZATION AND IGNITION CHARACTERISTICS IN DUAL-COMPONENT MIXED FUELS
Chang-Eon Lee(Inha University), Seungro Lee(Inha University), Masanori Okada, Masashi Matsumoto, Yoshimitsu Kobashi(Kanazawa Institute of Technology), Jiro Senda
Atomization and Sprays, 23(2), pp.141-164, 2013-5 (査読有)
5. 二成分混合燃料噴霧による圧縮着火機関の圧力上昇率およびエミッションの低減

前川浩輝(金沢工業大学) 小橋好充(金沢工業大学) 加藤聰(金沢工業大学), 千田二郎

自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 6, pp. 1263-1268, 2012-11 (査読有)

6. Simultaneous Reduction of Pressure Rise Rate and Emissions in a Compression Ignition Engine by Use of Dual-Component Fuel Spray
Y.Kobashi(Kanazawa Institute of Technology), H.Maekawa(Kanazawa Institute of Technology), S.Kato(Kanazawa Institute of Technology), J.Senda
SAE Int. J. Fuels Lubr. 5(3), pp.1404-1413. Also published as SAE 20120-32-0031, 2012-10 (査読有)
7. Development of Breakup Model for Large Eddy Simulation of Diesel Spray
K.Kitaguchi, S.Hatori, T.Hori(Osaka University), J.Senda
12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems – ICALSS 2012, pp.1-8, 2012-9 (査読有)
8. 着火性の異なる燃料の二段噴射により形成される混合気分布が PCCI 燃焼の着火・燃焼過程に及ぼす影響
松本雅至, 岸裏雅登, 小橋好充(金沢工業大) 松村恵理子(トヨタ自動車), 千田二郎
自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 4, pp. 875-880, 2012-7 (査読有)
9. Effect of KH-MTAB Breakup Model on LES of Diesel Spray under High Ambient Density Condition
Koji Kitaguchi, Soichi Hatori, Tsukasa Hori(Osaka University) and Jiro Senda
The Eighth International Conference on Modeling and

- Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2012), pp.1-6, 2012-7 (査読有)
10. Effects of Fuel Composition on Flame Lift-off Length and Pollutant Formation in Dual-component Fuel Spray
M.Okada, D.Shigetomi, M.Matsumoto, Y.Kobashi(Kanazawa Institute of Technology), J.Senda
The Eighth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2012), pp.1-6, 2012-7 (査読有)
 11. Chemical Thermodynamics Modeling of Vaporization and Ignition Processes in Dual-Component Fuel Spray
M.Matsumoto, C.E-Lee(Inha University), D.Shigetomi, M.Okada, Y.Kobashi(Kanazawa Institute of Technology), J.Senda
The Eighth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2012), pp/1-6, 2012-7 (査読有)
 12. Optimization of Breakup Model Using LES of Diesel Spray,
K.Kitaguchi, S.Hatori, T.Hori(Osaka University), J.Senda
Atomization and Sprays, 22-1, pp.57-77, 2012-4 (査読有)
 13. 各種アルコール燃料の混合がバイオディーゼル燃料の燃焼特性に及ぼす影響
松浦貴, 小橋好充(金沢工業大学), 桑原一成(大阪工業大学), 千田二郎
自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 455-460, 2012-3 (査読有)
 14. 二成分混合燃料噴霧の着火・燃焼機構と燃焼制御性に関する数値解析
小橋好充(金沢工業大学), 藤森健太(金沢工業大学), 前川浩輝(金沢工業大学), 加藤聰(金沢工業大学), 川野大輔(交通安全環境研究所), 千田二郎
自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 123-128, 2012-1 (査読有)
 15. Modeling of Auto-Ignition and Combustion Processes for Dual-Component Fuel Spray
Yoshimitsu KOBASHI (Kanazawa Institute of Technology), Kenta FUJIMORI (Kanazawa Institute of Technology), Hiroki MAEKAWA (Kanazawa Institute of Technology), Satoshi KATO (Kanazawa Institute of Technology), Daisuke KAWANO (National Traffic Safety & Environment Laboratory), Jiro SENDA
SAE Paper No. 2011-24-0001, 2011-9 / SAE Int. J. Engines August 2011 4 : 2193-2206 (査読有)
 16. Chemical Kinetics Study on Ignition Characteristics of Biodiesel Surrogates
Kazunari KUWAHARA (Osaka Institute of Technology), Koryu NAKAHARA (Osaka Institute of Technology), Yoshimitsu WADA (Kanazawa Institute of Technology), Jiro SENDA, Yasuyuki SAKAI (Fukui University), Hiromitsu ANDO (Fukui University)
JSAE 20119095 / SAE 2011-01-1926, pp. 780-797, 2011-8 (査読有)
 17. Effects of Mixedness and Ignition Timings on PCCI Combustion with a Dual Fuel Operation
Yoshimitsu KOBASHI (Kanazawa Institute of Technology), Daijiro TANAKA (Kanazawa Institute of Technology), Teppei MARUKO (Kanazawa Institute of Technology),

Satoshi KATO (Kanazawa Institute of Technology), Masato KISHIURA, Jiro SENDA

JSAE 20119206 / SAE 2011-01-1768, pp. 699-713, 2011-8 (査読有)

18. エタノールを混合したバイオディーゼル燃料に関する実験的研究 - 着火・火炎特性の基礎解析および排気特性

松浦貴, 井上泰宏, 千田二郎
自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 4, pp. 885-890, 2011-7 (査読有)

19. 急速圧縮膨張装置を用いた二段噴射燃料の着火・燃焼過程に関する研究

小橋好充(金沢工業大学), 城戸良仁, 岸裏雅登, 千田二郎, 藤本元, 柴田元(JX)

自動車技術会論文集, Vol.42, No.2, pp.477-482, 2011-3 (査読有)

20. エタノールの混合がバイオディーゼル燃料の噴霧燃焼特性に及ぼす影響

井上泰宏・松浦貴・千田二郎
日本マリンエンジニアリング学会誌 第46巻, 第2号, pp.116-121, 2011-2(査読有)

〔学会発表〕(計 33 件)

1. 燃料設計手法を用いたディーゼル噴霧における混合気形成過程に関する研究

桑原悠, 向山智之, 宮田哲次, 小橋好充(金沢工大), 松村恵理子, 千田二郎
第23回微粒化シンポジウム, pp.211-217, 2014-12/19

2. 二成分混合燃料を用いたディーゼル噴霧火炎の人為的制御(第2報, 雰囲気温度および雰囲気酸素濃度による影響)

宮田哲次, 向山智之, 桑原悠, 小橋好充(金沢工大), 桑原一成(大阪工大), 松村恵理子, 千田二郎

第25回内燃機関シンポジウム講演論文集(2014), pp114, 2014-11/27

〔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:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
研究室ホームページ
<http://comb.doshisha.ac.jp/>

6. 研究組織
(1)研究代表者
千田二郎 (Senda, Jiro)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 302226691

(2)研究分担者
桑原一成 (KUWAHARA, Kazunari)
大阪工業大学・工学部・教授
研究者番号: 00454554

(3)連携研究者
小橋好充 (KOBASHI, Yoshimitsu)
金沢工業大学・工学部・講師
研究者番号: 80469072