

平成21年 5月27日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17360102  
 研究課題名（和文） 時空間混合気制御による高効率・低エミッション噴霧燃焼法の開発  
 研究課題名（英文） High Efficiency and Low Emissions combustion based on Controlled-Mixture Formation 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

## 研究成果の概要：

本研究では、多成分燃料の物理・化学的特性を活用した、燃焼御法を提案している。ここで提案する燃焼制御手法は、多成分燃料の特性を利用し燃焼室内に形成される混合気の濃度分布の不均一性を操作し、着火および燃焼過程を時空間的に制御する方式である。本方式により、予混合圧縮着火燃焼法において急峻な燃焼を回避し、高負荷への運転可能領域が可能であること、低NO<sub>x</sub>を維持しながら高い燃焼効率を得ることを明かにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	9,000,000	0	9,000,000
2006年度	5,300,000	0	5,300,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
総計	15,600,000	390,000	15,990,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱力学、燃焼、内燃機関、燃料設計、圧縮着火機関、不均一性、混合気濃度分布

## 1. 研究開始当初の背景

近年の化石燃料枯渇問題、環境汚染に対する懸念から、ガソリン機関は高効率化のための筒内直接燃料噴射、ディーゼル機関は低公害化のために予混合化を取り入れた予混合圧縮自己着火燃焼（PCCI燃焼）など両機関の違いは無くなってきている。すなわち、ガソリン、ディーゼル機関の境界にとらわれず、燃焼室内で進行する混合気形成および燃焼の諸過程を如何に時空間制御し得るかが今後の課題となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、著者らのこれまでの多成分燃料に関する知見を勘案し、新たな燃焼御法を提案する。その概略を以下に述べる。

(1) 第一段階：多成分燃料噴霧に関する基礎研究

著者らはこれまで多成分燃料に関する基礎研究を実施してきた。本研究に関わる主要な知見を以下に示す。

① 沸点の大きく異なる成分から構成される多成分燃料は、圧力-温度線図上に気液混在の二相領域が形成され、高沸点成分の蒸発

性が向上する。

② 多成分燃料を構成する成分の沸点が十分に低い場合、燃料噴射時の急減圧により減圧沸騰を生じる。この噴霧は微粒化特性、蒸発性、分散性に優れ、自在な混合気濃度分布制御を可能にする。

(2) 混合気濃度不均一性制御とその着火・燃焼過程の解明

前節の事実を勘案し、燃焼室内における燃料濃度不均一性を制御するとともに、その着火・燃焼過程および排出ガス特性を明らかにする。そのため、

- ・減圧沸騰を伴う早期噴射と上死点近傍噴射の組み合わせによる燃料濃度分布制御の可能性の示唆
- ・各種不均一混合気における詳細な時空間的着火・燃焼過程の解明
- ・ポート噴射と直接噴射により形成された各種不均一混合気に対する燃焼・排気特性の解明

を実施する。

3. 研究の方法

(1) 供試燃料

減圧沸騰噴霧により混合気濃度不均一性を制御し得ることを実証するために、軽油系成分である n-トリデカン(セタン価 88, 沸点 510 K)にガソリン系成分である i-ペンタン(オクタン価 92, 沸点 301 K)をモル分率 0.8 として混合した燃料(C13/iC5 混合燃料)を用いた。また、不均一混合気の着火・燃焼過程を調べる際には、n-ヘプタン(セタン価 56, 沸点 372 K)と i-オクタン(セタン価 12, 沸点 372 K)からなる標準燃料を供試し、後者の体積分率を 0.45 とした PRF45 を用いた。

(2) 実験方法

実験にはボア×ストロークが 110 mm×106 mm の単気筒水冷機関を用い、水温 353 K, 油温 342 K 一定として運転を行った。筒内圧力はピエゾ式圧力センサ(KISTLER, 6125B)により、排出ガス濃度は MEXA1500D により測定した。スモーク濃度測定には AVL 社製 415s スモークメータを用いた。筒内直接燃料噴射には、C13/iC5 混合燃料の場合、噴孔径 0.2 mm の四噴孔ノズルを、PRF45 の場合、噴孔径 0.14 mm の八噴孔ノズルを用い、噴射圧力はそれぞれ 50 MPa, 40MPa とした。また、PRF45 は減圧沸騰を生じない。ここでは、早期噴射時の減圧沸騰が形成する希薄混合気を模擬するために多孔プレートノズルによるポート噴射を行い、これと上記の直接噴射を併用することで、混合気濃度を制御する。

4. 研究成果

(1) 減圧沸騰噴霧による混合気濃度不均一性制御

① 減圧沸騰噴霧の早期噴射への適用

まず、減圧沸騰噴霧を早期噴射に適用した結果を示す。図 1 は C13/iC5 混合燃料を用い、噴射時期を変化させた際の壁面付着燃料割合(=壁面付着燃料量/噴射燃料量)、有効噴射量から求めた燃焼効率、NO<sub>x</sub> およびスモーク値である。なお、本図は有効当量比  $\phi_{eff}=0.41$  に対する結果である。初期燃料温度  $T_f$  を 310K, 410K と変化させ、後者のみ、いずれの噴射時期においても減圧沸騰を生じるようにした。非減圧沸騰条件である  $T_f=310K$  においては、噴射時期が上死点前 60 度より早くなると著しく壁面付着燃料割合が増加し、上死点前 70 度以前でも、噴射時期が早いほどその値は増加する。一方、 $T_f=410K$  の壁面付着燃料割合は上死点前 70 度以前の噴射時期においてはほぼ一定である。噴射時期が早いほど筒内圧力が低く、燃料噴射時の急減圧過程において燃料は高い過熱度を得る。そのため、早期噴射時ほど活発な減圧沸騰が得られ、壁面付着燃料割合の増加を抑制したと考えられる。燃焼効率は、いずれの噴射時期においても  $T_f=410K$  の方が高い。減圧沸騰を伴う噴霧の低貫徹力化により、シリンダ壁面近傍の低温域に滞留する燃料量が減少し、燃焼の完結性が向上したと推察される。なお、上死点前 60 度より早期な噴射では、NO<sub>x</sub> およびスモーク値ともに極めて低い。高沸点成分を含む燃料であっても、低沸点成分の混合によりピストン頂面やその他の壁に付着して、局所に高当量比領域を形成することはない。

② 一段目噴射時期が混合気濃度不均一性と燃焼特性に及ぼす影響

前項において、減圧沸騰噴霧が早期噴射時の壁面付着等に関わる諸問題を解決し得ることを示した。しかし、この均一度の高い混合気の同時多点着火は急峻な燃焼を伴い、より高負荷における運転を困難にする。そこで、その問題を解決する

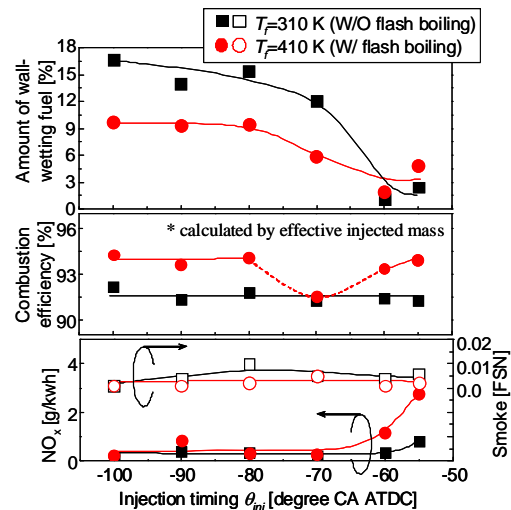


Fig.1 Effect of flash boiling spray on wall-wetting, combustion and emissions (C13/iC5 mixed fuel, single injection,  $\phi_{eff}=0.41$ ,  $\theta_{50\%}=5.5$  degree CA ATDC)

ため、本項以降では二段燃料噴射を適用し、混合気濃度不均一性を制御する。

図2に、C13/iC5混合燃料を用い、噴射量一定(EGR無し時の総括当量比 $\phi_{air}=0.43$ )、二段目噴射時期 $\theta_{inj,2nd}=-20$ 度、二段目噴射量割合 $Q_{inj,2nd}=30\%$ のもと、一段目噴射時期 $\theta_{inj,1st}$ を変化させた際の熱発生率履歴および最大圧力上昇率 $(dp/d\theta)_{max}$ を示す。なお、均一度の高い混合気の燃焼・排気特性は、燃焼時期に多大なる影響を受ける。そこで、高温酸化反応中の50%燃焼質量割合 $\theta_{50\%}$ はEGR率を調整し、上死点后3.75度に固定した。図から明らかなように、一段目噴射時期の早期化は燃焼を緩慢化と $(dp/d\theta)_{max}$ の低下を引き起こす。C13/iC5混合燃料中のn-トリデカンには活発な低温酸化反応(LTR)を有するため、二段目噴射が形成する混合気と一段目噴射のそれとの濃度差が大きい場合、LTRの当量比依存性により、両者の高温酸化反応(HTR)開始に位相差を生じる。これが着火・燃焼時期を時空間的に離散化させ、緩慢な燃焼を実現する主因である。

③ 二段目噴射時期および噴射量割合が混合気濃度不均一性と燃焼・排気特性に及ぼす影響  
本項では $\theta_{inj,1st}$ を上死点前80度に固定し、 $\theta_{inj,2nd}$ を変化させることで、着火・燃焼過程を時空間的に制御し得る混合気濃度分布状態を調べる。なお、本項においても前項と同様、C13/iC5混合燃料を用い、噴射量一定(EGR無し時の総括当量比 $\phi_{air}=0.43$ )のもと、 $\theta_{50\%}$ はEGR率により上死点后3.75度とした。

一段目噴射時期 $\theta_{inj,1st}=-80$ 度、二段目噴射量割合を $Q_{inj,2nd}=30\%$ に固定し、二段目噴射時期 $\theta_{inj,2nd}$ を変化させた際の熱発生率履歴を図3(a)に示す。 $\theta_{inj,2nd}$ を上死点前40度から遅角することで熱発生率のピーク値は低下し、 $\theta_{inj,2nd}=-$

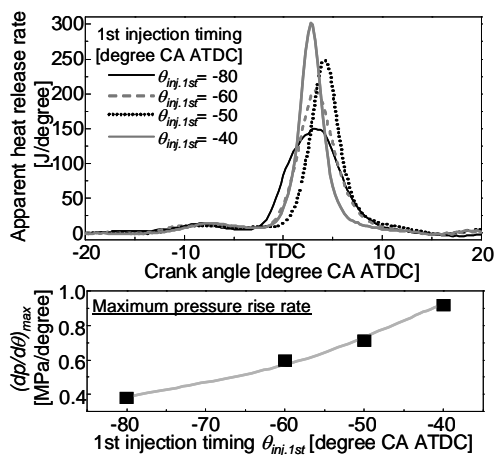


Fig.2 Effect of 1st injection timing on apparent heat release rate and maximum pressure rise rate (C13/iC5 mixed fuel,  $\phi_{air}=0.43$ ,  $\theta_{inj,2nd}=-20$ degree CA ATDC,  $Q_{inj,2nd}=30\%$ ,  $\theta_{50\%}=3.75$  degree CA ATDC)

上死点前20, 15度ではHTRにおける熱発生率が二段に分かれる様子が見られた。

$\theta_{inj,1st}=-80$ 度、 $\theta_{inj,2nd}=-20$ 度のもと、噴射量割合を変化させた際の熱発生率履歴を図3(b)に示す。一段目噴射のみの単段噴射から $Q_{inj,2nd}$ を増すにつれ、熱発生率のピーク値は低下した。しかし、 $Q_{inj,2nd}=30\%$ 以上となると、 $Q_{inj,2nd}$ の増加とともに熱発生率のピーク値が上昇する結果となった。

各 $\theta_{inj,2nd}$ 、 $Q_{inj,2nd}$ に対する $(dp/d\theta)_{max}$ を図4にまとめる。上図のとおり、 $\theta_{inj,2nd}$ が遅いほど $(dp/d\theta)_{max}$ は低下することから、二段目噴射の形成する混合気濃度が高いほど、希薄混合気との燃焼位相差が大きくなると推測できる。ただし、 $\theta_{inj,2nd}$ の最も遅い上死点前15度では、二段目噴射燃料と空気の混合が不十分となることから、その燃焼時期が遅れ、 $(dp/d\theta)_{max}$ は上昇する。 $\theta_{inj,2nd}=-20$ 度において、 $Q_{inj,2nd}=30\%$ が最も低く、ばらつきはあるものの、他の $\theta_{inj,2nd}$ においてもこの $Q_{inj,2nd}$ に対する $(dp/d\theta)_{max}$ がおおよそ最低値となる。換言すれば、適度な量の比較的リッチな混合気を離散的に分布させることが、最も効果的に $(dp/d\theta)_{max}$ を低減し得る。

各 $\theta_{inj,2nd}$ 、 $Q_{inj,2nd}$ に対するNOxとスモークの排出濃度を図5に示す。いずれの条件においても、スモーク排出濃度は極めて低い。EGR率を吸排気CO2濃度割合で定義した場合、燃焼時期制御に用いたその値は最大約40%である。しかし、形成される混合気が比較的リーンであることから、本実験条件では事実上スモークは排出されない。NOxは $Q_{inj,2nd}$ の増加に対し単調に増加する。二段目噴

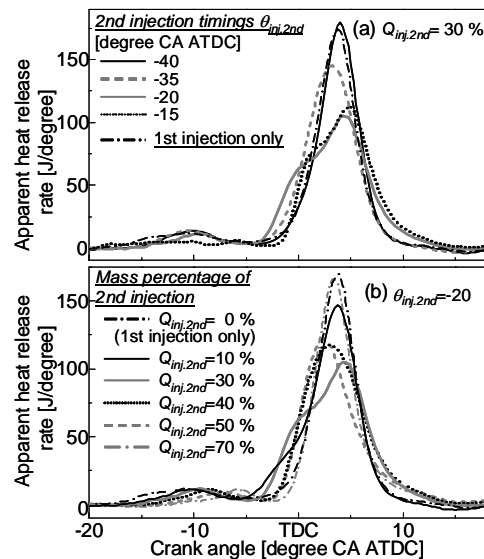


Fig.3 Histories of apparent heat release rate for 2nd injection timings (C13/iC5 mixed fuel,  $\phi_{air}=0.43$ ,  $\theta_{inj,1st}=-80$  degree CA ATDC,  $\theta_{50\%}=3.75$  degree CA ATDC)

射された燃料がその生成要因である。また、 $\theta_{inj,2nd}$  = 上死点前40度から20度にかけて  $Q_{inj,2nd}$  = 10, 30%のNO<sub>x</sub>は僅かに増加するが、その濃度は二段目噴射された燃料量の影響が支配的である。

(2) 不均一混合気の着火・燃焼過程

前節で示したように、減圧沸騰噴霧を利用すれば、燃焼室内の混合気濃度が制御可能である。本節ではこれまで用いた実機関と同型の可視化機関を用いて、前節と類似の不均一混合気の時空間的な着火・燃焼過程を調べる。

3. (2)節で述べたように、本節では実験の都合上、PRF45を供試する。この際、早期噴射時の減圧沸騰噴霧が形成する希薄混合気を模擬するためにポート噴射を行い、前節と同様、比較的リッチな混合気を直接噴射により供給した。

前節の結果との整合性を検証するため、直接噴射時期  $\theta_{direct}$  を上死点前20度に固定し、直接噴射量割合  $Q_{direct}$  を変更した。その熱発生率履歴を図6に示す。なお、ここでは吸気温度を変化させ、燃焼時期を制御した。本実験条件において、PRF45はC13/iC5混合燃料と同様、LTR時に活発な発熱反応を生じることが確認できる。また、各熱発生率履歴において、 $Q_{direct}$  = 10%と50%のピーク値の差および絶対値は前節と異なるものの、 $Q_{direct}$  = 20%においてピーク値が低下する傾向はとらえている。

ここで、 $Q_{direct}$  = 20%, 50%におけるHTR開始時

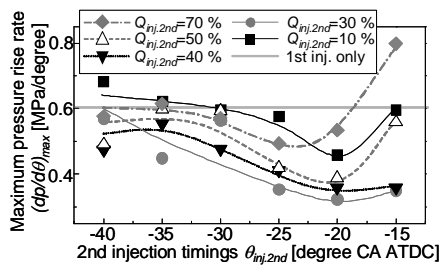


Fig.4 Maximum pressure rise rates (C13/iC5 mixed fuel,  $\phi_{al}$ =0.43,  $\theta_{inj,1st}$  = -80 degree CA ATDC,  $\theta_{50\%}$  = 3.75 degree CA ATDC)

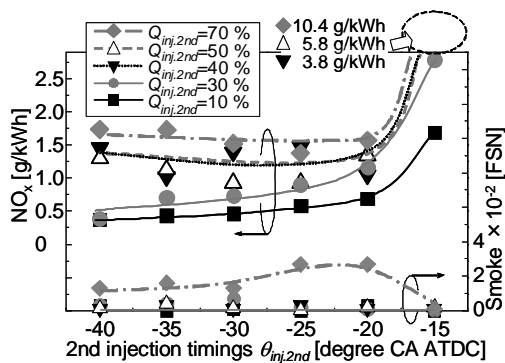


Fig.5 NO<sub>x</sub> and smoke emissions (C13/iC5 mixed fuel,  $\phi_{al}$ =0.43,  $\theta_{inj,1st}$  = -80 degree CA ATDC,  $\theta_{50\%}$  = 3.75 degree CA ATDC)

および50%燃焼質量割合・50%に達した時点の自発光をイメージインテンシファイア付 CCDカメラによりとらえた。その結果を図7に示す。参考のため、図にはポート噴射のみ( $Q_{direct}$  = 0%)の時系列画像も示した。 $Q_{direct}$  = 0%の場合、自発光は燃焼室中央付近から全域に広がるのに対し、 $Q_{direct}$  = 20, 50%では燃焼室局所からHTRが開始

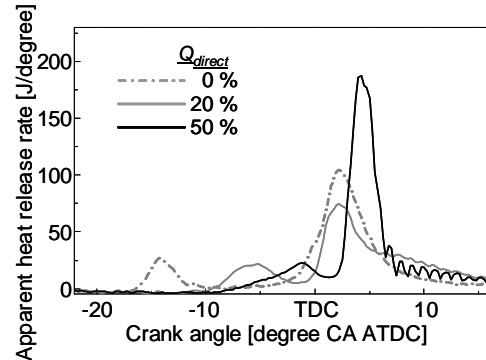


Fig.6 Histories of apparent heat release rate for mass percentages of direct injection (PRF45,  $\phi_{al}$ =0.38,  $\theta_{direct}$  = -20 degree CA ATDC,  $\theta_{50\%}$  = 3.0 degree CA ATDC)

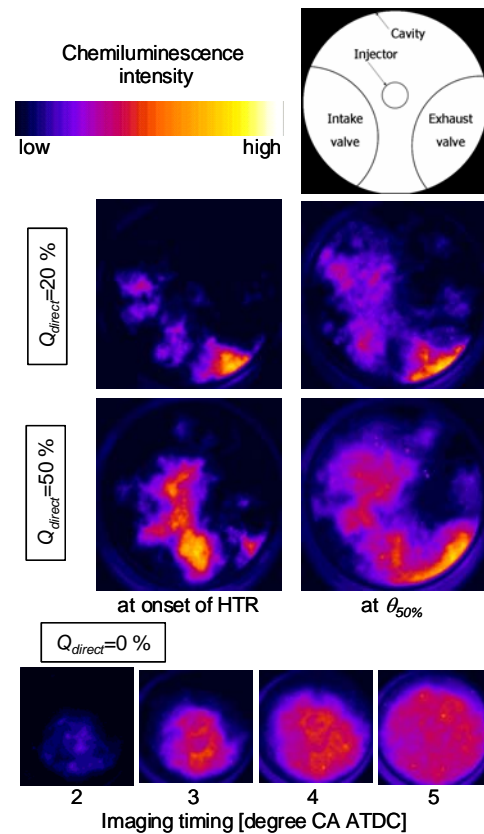


Fig.7 Chemiluminescence images taken with I.I.+CCD camera for mass percentages of direct injection (PRF45,  $\phi_{al}$ =0.38,  $\theta_{direct}$  = -20 degree CA ATDC,  $\theta_{50\%}$  = 3.0 degree CA ATDC)

される。このことから、直接噴射された燃料が着火源となることがわかる。また、これらの画像は別サイクルから取得しているが、発光は概ね着火源から拡がるように見られる。 $Q_{direct} = 20\%$ と $50\%$ を比べると、後者ほどHTR開始時の発光領域が広く、 $50\%$ においても発光領域が広範囲に分布する。このため、 $Q_{direct} = 20\%$ では直接噴射された燃料が燃焼を時間・空間的に離散化するのに対し、 $Q_{direct} = 50\%$ では広範囲に進行するリッチ混合気の燃焼が周囲の希薄混合気の着火・燃焼を促し、急峻な燃焼を引き起こしたと推察される。

### (3) まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- ・ 活発なLTRの発熱を有する燃料が上死点近傍の早期に直接噴射される場合、先に供給される希薄混合気に比べ、早期に着火を開始する。
- ・ 着火源から燃焼領域が拡大する。
- ・ 着火源となるこの比較的リッチな混合気が燃焼室内に離散的に分布する場合、最大圧力上昇率が効果的に低減される。

## 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12件)

- ① Y. Wada 1 番目, J. Senda 3 番目, (他 2 名), Combustion Control in DI Compression Ignition Engine with Partially Premixed Charge Operation Using Flashing Spray of Mixed Fuel, COMODIA2008, pp.151-158, 2008, 査読: 有
- ② 和田好充 1 番目, 千田二郎 4 番目, (他 3 名), 二成分混合燃料の減圧沸騰噴霧を用いた部分予混合燃焼に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.1, pp.123-128, 2008, 査読: 有
- ③ Y. Wada 1 番目, J. Senda 6 番目, (他 5 名), Controlling PCCI Combustion with Mixed Fuel-Effect of Fuel ignitability, Compression Ratio and Charge Heterogeneity-, Review of Automotive Engineering Vol. 29, No.1, pp.65-71, 2008, 査読: 有
- ④ 和田好充 1 番目, 千田二郎 5 番目, (他 4 名), 燃料の着火性と濃度不均一性が直接噴射式PCCI機関の燃焼特性・運転範囲に及ぼす影響, 日本機械学会論文集(B編), 73 巻, 728 号, pp.1121-1128, 2007, 査読: 有
- ⑤ Y. Wada 1 番目, J. Senda 5 番目, (他 4 名), Controlling PCCI Combustion with Mixed Fuel-Application of Flashing Spray to Early Injection-, SAE Technical Paper, No. 2007-01-0624, pp.1-18, 2007,

査読: 有

- ⑥ 和田好充 1 番目, 千田二郎 5 番目, (他 6 名), 混合燃料の化学的性質と蒸発特性がディーゼル噴霧の自着火過程に及ぼす影響, 日本機械学会論文集(B編), 72 巻, 717 号, pp.1371-1377, 2006, 査読: 有
  - ⑦ 和田好充 3 番目, 千田二郎 4 番目, (他 3 名), ガソリン系燃料を用いた多段燃焼法の研究, 自動車技術会論文集, Vol.37, No.5, pp.51-56, 2006, 査読: 有
  - ⑧ Y. Wada 1 番目, J. Senda 5 番目, (他 4 名), A Fundamental Study on Ignition Characteristics of Two-Component Fuel in a Diesel Spray, SAE Technical Paper, No. 2006-01-3383, pp.1-10, 2006, 査読: 有
  - ⑨ 和田好充 1 番目, 千田二郎 5 番目, (他 4 名), 燃料の着火性および混合気の不均一性によるHCCI燃焼の限界究明, 同志社大学理工学研究報告, 第47巻, 第3号, pp.136-142, 2006
  - ⑩ Y. Wada 1 番目, J. Senda 5 番目, (他 4 名), Effect of Octane Rating and Charge Stratification on Combustion and Operating Range with DI PCCI Operation, SAE Technical Paper, No. 2007-01-0053, pp.1-13, 2007, 査読: 有
  - ⑪ 和田好充 1 番目, 千田二郎 6 番目, (他 5 名), 混合燃料による予混合圧縮着火機関の燃焼制御(第1報)-種々の過熱度および雰囲気条件下における減圧沸騰噴霧の特性-, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.1, pp.85-90, 2007, 査読: 有
  - ⑫ 和田好充 1 番目, 千田二郎 5 番目, (他 4 名), 混合燃料による予混合圧縮着火機関の燃焼制御(第2報)-減圧沸騰噴霧の適用による燃焼改善-, 自動車技術会論文集, Vol.38, No.1, pp.91-96, 2007, 査読: 有
- [学会発表] (計8件)
- ① 和田好充 4 番目, 千田二郎 5 番目, (他 4 名) 燃料の着火性および混合気の不均一性がPCCI燃焼に与える影響, 自動車技術会 2008 年秋季大会講演会, 2008-10, 名古屋国際会議場
  - ② 千田二郎 1 番目, 和田好充 2 番目, (他 3 名) 混合燃料の減圧沸騰噴霧を用いた部分予混合燃焼に関する研究, 自動車技術会 2008 年春季大会講演会, 2008-5, パシフィコ横浜
  - ③ 和田好充 2 番目, 千田二郎 3 番目, (他 2 名), 混合気の不均一性を考慮したPCCI燃焼における燃焼制御の検討, 日本機械学会 関西支部第 83 期提定時総会講演会, 2008-3, 大阪大学
  - ④ 和田好充 2 番目, 千田二郎 3 番目, (他 2

名), 燃料設計を適用した混合気濃度の不均一による高負荷PCCI運転の検討, 日本機械学会関西支部第 83 期提定時総会講演会, 2008-3, 大阪大学

- ⑤和田好充 1 番目, 千田二郎 4 番目, (他 3 名), 二成分混合燃料による予混合圧縮着火機関の燃焼制御-減圧沸騰噴霧の適用-, 自動車技術会春季学術講演会, pp. 25-28, 2006-5, パシフィコ横浜
- ⑥和田好充 2 番目, 千田二郎 4 番目, (他 3 名) 燃料の着火性および混合気の不均一性がHCCI機関の燃焼特性に与える影響, 自動車技術会春季学術講演会, 2006-5, パシフィコ横浜
- ⑦和田好充 2 番目, 千田二郎 4 番目, (他 3 名) 二成分混合燃料による予混合圧縮着火機関の燃焼制御(第 2 報)-減圧沸騰を伴う二成分混合燃料噴霧の壁面衝突挙動-, 自動車技術会春季学術講演会, 2006-9, パシフィコ横浜
- ⑧和田好充 3 番目, 千田二郎 4 番目, (他 3 名) 燃料設計による混合気濃度制御のPCCI 機関への応用, 第 82 期定時総会講演会, 2007-3, 大阪産業大学

## 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: 30226691

### (2) 研究分担者

藤本 元 (FUJIMOTO HAJIME)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90051630  
小橋 好充 (KOBASHI YOSIMITU)  
金沢工業大学・工学部・講師  
研究者番号: 80469072