

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560177

研究課題名（和文）ディーゼル機関の燃焼室壁面に堆積するバイオ燃料残渣の研究

研究課題名（英文）Study of bio-fuel deposits clung on a combustion chamber wall of diesel engine

研究代表者

新井 雅隆 (ARAI MASATAKA)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80112176

研究成果の概要（和文）：

本研究では液滴の滴下と蒸発装置を使用し、1万滴以上の単一燃料液滴を繰り返し高温蒸発面上に滴下させ、そこでの蒸発に伴う堆積物の成長を計測した。まず、液滴の繰り返し滴下間隔や蒸発壁面温度と堆積物の生成メカニズムの関係を調べた。その傾向を実機関と比較した結果、本計測手法は、ディーゼル機関における堆積物の成長予測の簡易モデル試験として有効であることを明らかにした。結果としては、壁面が燃料で濡れているか否かと壁面の温度条件が、堆積物の成長を支配する主要因子であることを明らかにした。また結果をもとに、堆積物の成長に関する実験式を得ることができた。さらにバイオ燃料であるRMEについてはディーゼル軽油に比べ10倍以上の堆積物の成長速度を示すことを明らかにすることができた。

研究成果の概要（英文）：

In this study, using droplet dripping and evaporation test rig, over ten thousands fuel droplets were dripped on a hot surface repeatedly, and evaporation deposits formed from them were quantitatively analyzed. Then, hot surface temperature and dripping interval were discussed with formation mechanism of evaporation deposits. Under various surface temperatures with fixed dripping intervals for diesel fuel test, developed test rig showed that it could be useful for simple evaluation method of evaporation deposits. Results show that wet-dry condition and hot surface temperature were main controlling factors of deposits development. Empirical equations of deposits development were derived from the experimental results. Further carbonaceous evaporation deposits from RME were around ten times serious than diesel fuel.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：内燃機関

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：バイオマス、輸送機器、エネルギー効率化、環境対策、エネルギー全般

## 1. 研究開始当初の背景

### 研究の社会的背景

地球温暖化防止の観点からカーボンニュートラルの燃料であるバイオディーゼル燃料（植物油をエステル化して作られた軽油相当の燃料）の使用が開始されようとしている。またこのようなバイオディーゼル燃料の使用拡大は化石燃料資源を持たない我が国にとっては化石燃料に取って代わる燃料資源を確保する意味で、エネルギーセキュリティの面からも緊急の課題である。

バイオディーゼル燃料 (Bio-diesel fuel、以下 BDF と略記) の使用に当たっては、経済性、機関としての出力特性、有害排出物の挙動などが事前評価の項目として挙げられ、多くの研究や技術開発が行われてきたが、現状では市販の軽油を用いた状態から著しく機関性能や有害排出物特性が悪化することがないことが明らかにされ、この結果として BDF の使用が加速されつつある。

一方、トラックの動力源の主流となっているディーゼル機関は、使用年限が 10 年以上で走行距離も 100 万キロを越えることが一般的であり、燃料に合わせた機関の耐久性もこの長期間におよぶ運転に対応したものでなければならない。現状の燃料の改質や変更が非常にゆっくりとしたペースで行われている理由の一つに、この長期間の耐久性を機関や燃料の製造段階で確認することが挙げられる。幸いに既存の燃料や既存の機関については、短期間の加速試験によりこの耐久性を判断する技術資料を蓄積してきたので、現状の軽油の改質レベルであれば、1~2 年の耐久試験により 10 年後の機関の性能劣化を予想できる状態になっている。しかし、バイオディーゼル燃料のように植物性の含酸素炭化水素化合物をエステル化して作られた燃料については、現状までの技術蓄積のなかで、機関の耐久性を推定する場合に利用可能な技術資料は限定され、未知の燃料が及ぼす機関の劣化問題を基本的研究からやり直す必要に迫られている。

最初に述べたように、バイオディーゼル燃料の使用拡大は今日的な緊急課題であり、数年をかけて行うような耐久性試験を個別の BDF ごとに行って、BDF と機関の適合性を明らかにするだけの時間的ゆとりがないのが現状である。このためには、使用拡大を予定している種々の BDF と機関との適合性を明らかにする新しい手法を見出し、早急に機関の耐久性を劣化させることがない BDF を選び出す必要に迫られている。従って新たな手法による適合性の確認と機関の耐久性悪化の防止はバイオディーゼル燃料のエネルギー利用拡大のためにぜひとも必要な技術開発といえる。

### 研究の技術的背景

ディーゼル機関の耐久性を劣化させる大きな要因に、機関の燃焼室内に堆積する燃料残渣がある。燃料残渣がディーゼル機関の燃料噴射系統に堆積すれば、良好な燃料噴霧が得られなくなり、燃焼の悪化と有害排出物の増加を引き起こす。この残渣が燃焼室壁面に残渣が堆積すると、壁面での放熱不良のため異常燃焼が発生する。また残渣はミネラル系の酸化物が、多孔質物質として層状に壁面に付着するものであるため、堆積した多孔質層内に浸透した燃料は燃焼せずに排気行程にて排出され、未燃炭化水素類の排気公害の原因となる。さらに残渣がディーゼル機関の後処理触媒に付着し堆積すれば、触媒の活性を抑制することになり、後処理装置とすれば致命的なダメージを負うことになる。

ディーゼル燃料として用いられている軽油は沸点が 350℃程度の蒸留油である。蒸留油であるということは、一度沸点以上に加熱され気化した炭化水素類を液体に戻したものであり、再度加熱して 350℃以上にしても、さほど熱分解は進行せず、着火温度の 500℃近辺までは熱的に安定なことを意味している。さらに蒸留油であるために、ミネラル等の不純物が少ないこともその特の一つである。

一方バイオディーゼル燃料 (BDF) は、植物を圧搾して搾り取るかまたは低温で抽出した植物油にメタノール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) と苛性カリ (KOH) を加えてエステル化した脂肪酸メチルエステル ( $\text{R-COOCH}_3$ ) であり、精製の全過程を通じての加熱時の最高温度は 100℃以下である。このことは BDF の沸点が 350℃前後で軽油に近いとしても、350℃以上に気化した場合に熱的安定である保証が全くされていないものである。すなわち 350℃前後での気化と前後して熱分解と炭化が進行するので炭化物として残渣が燃焼室壁面に堆積する恐れがある。さらに蒸留油でないことは植物を構成している多くのミネラル分が BDF の中にも本質的に含まれることになる。よって BDF を燃焼させた場合の残渣は、軽油の場合と異質であり、燃焼室壁面への堆積量も軽油の場合より飛躍的に増加することが容易に想定される。

## 2. 研究の目的

ディーゼル機関の燃焼室内の温度条件に見合う高温壁面上に BDF 液滴を 1000 滴~10000 滴程度滴下する繰り返し滴下実験を行い、単一 BDF 液滴の、『高温壁面衝突』、『高温壁面での蒸発』、『高温壁面上での付着燃料の熱分解』、『付着燃料の炭化』、『残渣の堆積メカニズム』を明らかにする。さら実機関で行う残渣の堆積過程の実験結果と高温壁面

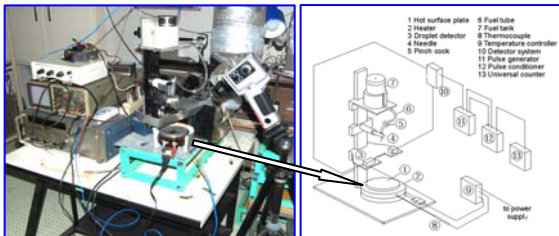
上での実験結果の相関を確認した後、上記高温壁面上への滴下実験により各種のBDFの機関適合性の評価指標を導出する。

### 3. 研究の方法

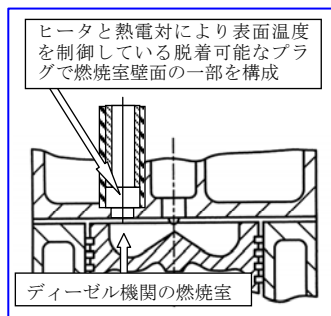
図に示すように高温壁面に燃料液滴を一定の時間間隔で連続的に落下させ、『高温壁面衝突』、『高温壁面での蒸発』、『高温壁面上での付着燃料の熱分解』、『付着燃料の炭化』、『残渣の堆積メカニズム』を解析する装置を製作したので、これを用いて研究を行う。この装置の特徴は

- (1) 機関のピストンヘッドと同じアルミ合金製の温度制御された高温壁面が軽量化されていて、100  $\mu\text{g}$  の分解能で表面に堆積した燃料残渣の質量を計測することができる。
- (2) ピンチコックにより滴下の間隔を制御し、前滴の蒸発が終了以前に次の液滴を滴下する場合（濡れ面条件）や前滴の蒸発が完了した後に次ぎの液滴を滴下する場合（乾燥面条件）を制御することができる。
- (3) レーザセンサーを用いた滴下液滴の計数システムを備え、数千滴の滴下実験を同じ条件で繰り返し行うことができる。

である。この装置を用いて、10,000滴以上の滴下を繰り返して実験を行った。



高温壁面上への連続滴下による燃料残渣の堆積実験



実機関での堆積実験の概要

さらに、実ディーゼル機関のシリンダヘッドに図に示したような加工を施し、ヘッドの一部を脱着可能なプラグ構造とし、プラグの燃焼室に露出している部分の温度制御を熱電対とヒータによって行う。機関の運転条件

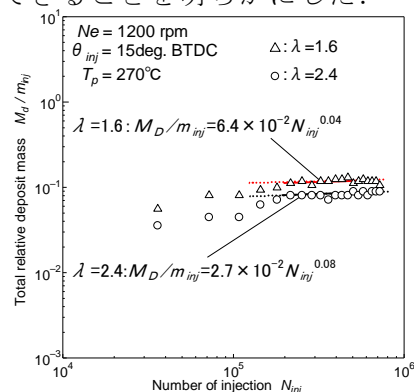
とこのプラグ表面への燃料残渣の堆積とその堆積量の増加傾向を定量的に調べ、上記基礎実験の結果との相関を明らかにした。

### 4. 研究成果

平成20年度

- (1) 温壁面上への連続滴下による燃料残渣の堆積実験
  - (1-1) 実験準備として開発している『高温壁面上への連続滴下による燃料残渣の堆積実験』による本格的な実験を開始し、実験の管理、測定データの整理方法、堆積した燃料残渣の特性解析方法を検討した。その結果、10,000滴以上の滴下実験を行えば、目的とする残渣の研究ができることが明らかになった。
  - (1-2) 燃料としてはパーム油をエステル化して製造した3種類のBDFを中心にBDFと軽油のブレンド燃料について調べた。その結果BDFの残渣は軽油に比べて10倍程度多いことが明らかになった。
  - (1-3) 燃料以外に、壁面の温度、液面の状態が常に燃料液膜で覆われている『濡れ面条件』と滴下ごとに液膜の蒸発が終了する『乾燥面条件』が現象を支配していて、さらに壁面温度条件として最大蒸発率を示す温度と実際の壁面温度の相違が現象を左右すること、また壁面上の残渣の低温酸化も無視できないことを明らかにした。
- (2) ディーゼル機関の燃焼室への燃料残渣の堆積実験

実機関の燃焼室内における燃料残渣の堆積を調べる実験装置を完成させた。さらに軽油と軽油に沸点の高い潤滑油を混ぜた2種類の燃料を使用して、堆積の進行程度を調べ、堆積の進行が燃料に依存することを明らかにした。またその相違は、上記の基礎実験によって十分予測できることを明らかにした。



実機関における堆積物の成長挙動

平成 21 年度

- (3) 高温壁面上への連続滴下による燃料残渣の堆積実験
- (3-1) 燃料としてはパーム油をエステル化して製造した3種類のBDFを中心にBDFと軽油のブレンド燃料について調べた。混合燃料の場合には、堆積の進行は軽油に含まれるBDFの性状により定まり、混合比の影響はさほど大きくないことが明らかになった。
- (3-2) 燃料の最大蒸発温度点と壁面温度の温度差に注目した実験を行った。壁面の温度、液面の状態が常に燃料液膜で覆われている『濡れ面条件』と滴下ごとに液膜の蒸発が終了する『乾燥面条件』が現象を支配していて、さらに壁面温度条件として最大蒸発率を示す温度と実際の壁面温度の相違が現象を左右すること、またこの問題の本質には滴下の繰り返しごとに堆積した残渣物の表面が乾燥するか否かに依存することを明らかにした。
- (3-3) 燃料を灯油にかえたところ、実験装置の配管に使用したシリコンチューブからの成分の溶出が問題になることが明らかになり、実験装置の大幅な改良を行った。

(4) ディーゼル機関の燃焼室への燃料残渣の堆積実験

機関のシリンダヘッドの組込んだ残渣堆積物の測定プラグの温度を 240℃～300℃と変化させて、残渣物の堆積状態を調べた。その結果、温度の低い場合に堆積の進展が著しいことが明らかになった。

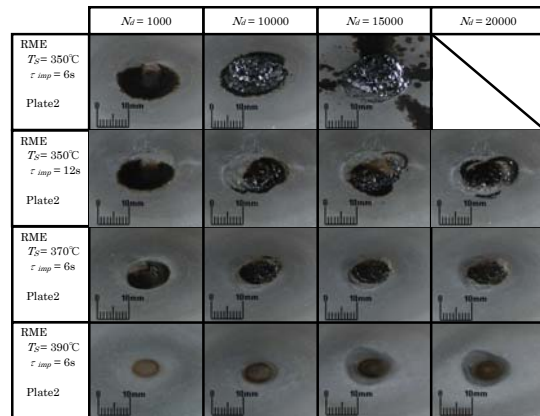
平成 22 年度

- (5) 高温壁面上への連続滴下による燃料残渣の堆積実験
- (5-1) 燃料としてはバイオ燃料の主成分であるリノール酸、リノール酸メチルエステルなどとJetA1燃料を使用し、燃料についての絶対評価が行えるようにした。また装置内の樹脂系配管の一部から物質が溶出していることが明らかになったので、配管をすべてステンレスパイプに交換した。さらに蒸発面の表面性状により堆積物の広がりにも相違がみられるので、これを補正するデータ処理方法を確立した。
- (5-2) 燃料成分の中で、炭素の二重結合が多いと堆積物が増加する傾向にあることを明らかにした。
- (5-3) 300℃以上の高温壁面では堆積と

堆積したものの酸化がバランスして、堆積物の質量が増加しない状況が生じることを明らかにした。

(6) ディーゼル機関の燃焼室への燃料残渣の堆積実験

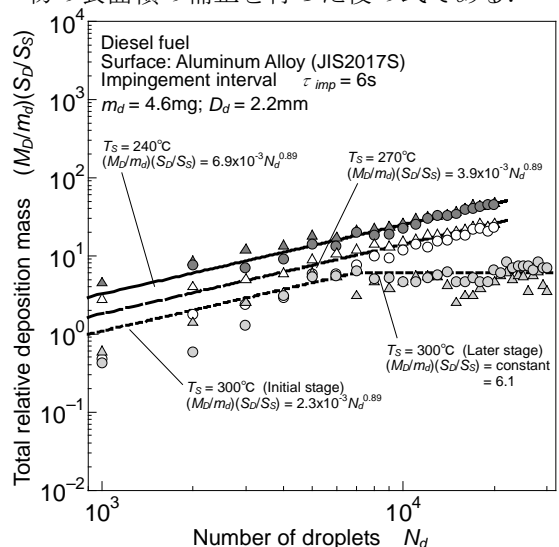
以下の写真はRMEで行った滴下試験の結果である。



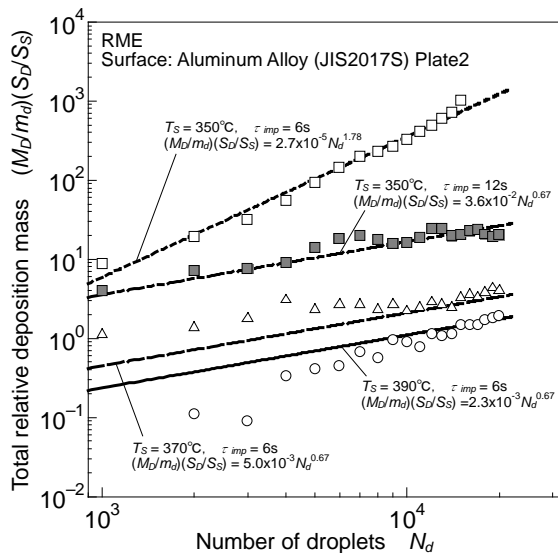
さらに機関のシリンダヘッドの組込んだ残渣堆積物の測定プラグの温度を 240℃～300℃と変化させて、残渣物の堆積状態を調べた。その結果、温度の低い場合に堆積の進展が著しいことが明らかになった。この結果は昨年度と同じであるが、再現性の確認のために長時間の実験をおこなった。さらに高温の場合では、堆積と酸化が同時進行して堆積物の体積増加が押さえられることを明らかにした。

まとめ

最終的に得られたディーゼル軽油と RME についての堆積物の成長挙動と温度条件ごとの実験式を以下に示す。図中の実験式は堆積物の表面積の補正を行った後の式である。



ディーゼル軽油についての最終結果と実験式



RME (ラプシードメチルエステル) についての最終結果と実験式

### 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5件)

1. Y. M. Arifin, Y. Tsuruta, T. Furuhashi, M. Saito, and M. Arai, Substitute procedure for engine deposition test to investigate diesel and biodiesel fuel deposits, Journal of the Energy Institute, 査読有, Vol. 83, No. 3, (2010), pp160-170.
2. Yusmady Mohamed Arifin and Masataka Arai, The effect of hot surface temperature on diesel fuel deposit formation, 査読有, Vol. 89(2010), pp934-942.
3. Yusmady Mohamed Arifin and Masataka Arai, Deposit characteristics of diesel and bio-diesel fuel, Fuel, 査読有, Vol. 88(2009), pp2163-2170.
4. Yusmady Mohamed Arifin, Tomohiko Furuhashi, Masahiro Saito, Masataka Arai, Diesel and Bio-blended Diesel

Fuel on a Hot Surface, 自動車技術会論文集, 査読有, 39-3 (2008), pp207-213  
 5. Yusmady Mohamed Arifin, Tomohiko Furuhashi, Masahiro Saito, Masataka Arai, Diesel and bio-diesel fuel deposits on a hot surface, Fuel, 査読有, Vol. 87(2008), pp1601-1609.

[学会発表] (計2件)

1. Yusmady Mohamed Arifin, Yutaka Tsuruta, Masataka Arai, Availability of Hot Surface Deposition Test for Bio-diesel Fuel Deposits in Engine Asia-Korea Conference on Advanced Science and Technology, 2008.10.24, 東京,
2. Yusmady Mohamed Arifin, Tomohiko Furuhashi, Masahiro Saito, Masataka Arai, Influence Factors of Deposits Formation on a Hot Surface for Diesel and Bio-Blended Diesel Fuel, The Seventh International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA), 2008.7.29, 札幌

[その他]

学位論文

Yusmady Bin Mohamed Arifin  
 Diesel and Bio-diesel Fuel Deposits on a Hot Wall Surface, Gunma University (2009).

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 雅隆 (ARAI MASATAKA)  
 群馬大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：80112176

(2) 研究分担者

古畑 朋彦 (FURUHATA TOMOHIKO)  
 群馬大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：80261585