

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25年 5月15日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560186

研究課題名（和文） 藻類由来バイオマス燃料の航空用ジェット燃料としての利用

研究課題名（英文） Utilization of a biomass fuel derived from algae as jet fuel

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：藻類由来のバイオマス燃料のジェット燃料としての利用に関するデータを得るために、高温壁面上での燃料滴の蒸発試験と試験燃焼炉による噴霧燃焼実験を行った。蒸発試験の結果、藻類由来のバイオマス燃料に最も多く含まれるリノール酸を添加したジェット燃料は蒸発速度が低下し、デポジット量も増加した。リノール酸メチルエステルを添加した燃料ではリノール酸添加燃料に比べデポジット量は大幅に減少した。噴霧燃焼実験の結果、植物油を添加した灯油を燃焼させた場合、添加しない灯油の燃焼と燃焼排ガス組成は変わらないが、PM 排出量は減少した。

研究成果の概要（英文）：To obtain data about utilization of a biomass fuel derived from algae as jet fuel, a evaporation test using a hot surface and spray combustion experiment of test fuel were carried out. As the results of the evaporation test, it was clear that the evaporation rate of a jet fuel to which linoleic acid was added was decreased and the deposit mass formed from it was increased compared with pure jet fuel. Linoleic acid is the fatty acid which is contained most in the biomass fuel derived from algae. When a jet fuel to which linoleic acid methyl ester was added was tested, on the other hand, the deposit mass was greatly decreased. As the results of the spray combustion experiment, the composition of the exhaust gas from combustion of kerosene to which a vegetable oil was added was very close to that from pure kerosene combustion. However, the PM mass exhausted from combustion of vegetable oil added kerosene was decreased to 70% of that from pure kerosene combustion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：燃焼工学

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、再生可能エネルギー、燃焼、エネルギー全般、環境技術

1. 研究開始当初の背景

我が国のCO₂排出量を2020年までに1990年比で25%削減するという目標が掲げられ、この目標を達成すべく、技術的な解決策を積極的に開拓していくことが急務となっている。炭素を含む燃料の燃焼時に排出されるCO₂を削減する方法として、バイオマス燃料の使用が挙げられる。すでに、パーム油や大豆油などをメチルエステル化して得られるバイオディーゼル燃料(BDF)は、低公害なディーゼル燃料として実用化されつつある。しかしながら、バイオマス燃料は、大豆やトウモロコシなど食料生産と競合する点や、栽培面積や生産量に限界があることなど問題も多く、新たな生産方法が模索されている。その点で注目されているのが、藻類を用いたバイオマス燃料生産である。藻類を用いた場合の面積1haあたりの油の収量は大豆と比較して100倍以上、アブラヤシと比較しても10倍以上といわれ、次世代のバイオマス燃料生産方法として期待が高まっている。そこで、藻類由来のバイオマス燃料の燃焼特性を把握しておくことは、将来のバイオマス燃料の利用拡大をスムーズに進める上で極めて重要である。

バイオマス燃料について近年の動きで注目すべきは航空用ジェット燃料としての利用である。2009年1月30日に日本航空は、ヴァージン・アトランティック航空、ニュージーランド航空、コンチネンタル航空に次いで、世界で4番目にバイオマス燃料を用いたテストフライトを行っている。しかし、バイオマス燃料を航空用ジェット燃料として利用するためにはいくつかの問題がある。一つは低温流動性の問題であり、石油系燃料に比べ凍結しやすいことが知られているが、これは、ジェット燃料との混合比や、場合によっては適切な改質により解決できると考えられる。より重要な問題として、燃焼の観点からの本質的な問題は、着火性および保炎性の問題、排ガス性状(NO_x、すす、HC)の問題、および燃焼残さ物生成の問題である。着火性および保炎性は、燃焼の安定性や高空での再着火特性と密接に関連する。排ガス性状は大気汚染の抑制の観点から重要な検討項目である。航空機エンジンについてもNO_x、すすおよびHCの排出規制が強化されており、燃料の変更によるこれら大気汚染物質の排出量増加は容認できない。すすについては、バイオマス燃料の場合燃料分子中に酸素を含むため、燃焼時のすす生成量が減少することは、ディーゼルエンジンについては確認されているが、ジェットエンジンのような連続燃焼時にも同様かどうかは改めて確認すべきである。さらには粘度などの燃料性状の違いによる微粒化特性の変化に伴うNO_xやHCの排出量の増減についても確認することが必

要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、藻類由来のバイオマス燃料を航空用ジェット燃料として使用するという観点から、藻類由来バイオマス燃料と灯油あるいはジェット燃料との混合燃料の蒸発特性および蒸発残さ(デポジット)の生成特性を調査するとともに、連続噴霧燃焼時の燃焼特性や排ガス性状(NO_x、CO)、および排ガス中に含まれる粒子状物質(PM)の生成特性について調査することを目的とする。さらに、それらの特性をジェット燃料に近い性状の灯油、あるいはジェット燃料そのものでも同様に調査し比較検討する。

3. 研究の方法

(1) 蒸発およびデポジット生成試験

燃料の蒸発速度およびデポジットの生成特性は、高温壁面に燃料の単一液滴を繰り返し滴下する方法を用いて調査した。試験装置を図1に示す。

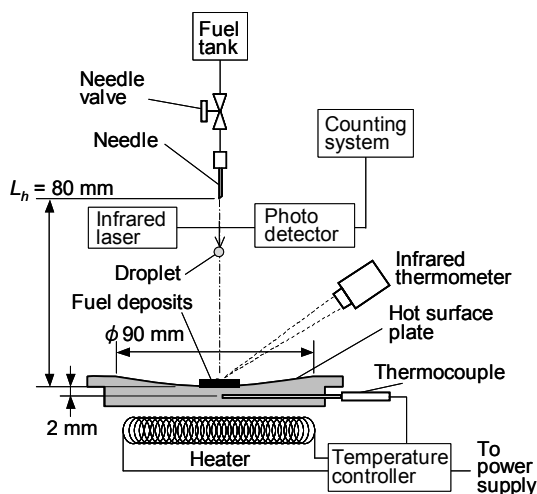


図1 蒸発およびデポジット試験装置

この装置は燃料の単一液滴を温度制御された凹型の壁面に一定間隔で滴下できるようになっている。蒸発試験では、燃料液滴を壁面に滴下してから蒸発して消失するまでの時間を液滴寿命 τ_{life} とした。デポジット試験では、一定の時間間隔で液滴を連続的に滴下し、規定の滴下液滴数に到達するごとに壁面に生成したデポジットの質量を測定した。

バイオマス燃料には各種の脂肪酸が含まれ、脂肪酸の種類や組成が蒸発特性やデポジットの生成特性に大きく影響すると考えられる。そこで本研究では脂肪酸の種類の影響を検討するため、藻類由来のバイオマス燃料に最も多く含まれるリノール酸と、比較対象としてオレイン酸とカプリン酸をそれぞれジェット燃料(JetA-1)に10wt%添加したも

のを試験燃料として用いた。さらにバイオマス燃料は燃料としての特性を改善するためにエステル化されることが多いことから、リノール酸メチルエステルとオレイン酸メチルエステルをそれぞれ 10wt%添加したジェット燃料についても試験を行った。

(2) 噴霧燃焼試験

噴霧燃焼試験では図 2 に示す試験燃焼炉を用いた。

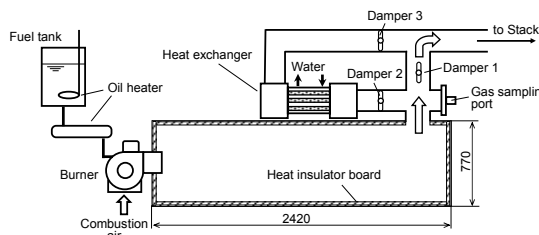


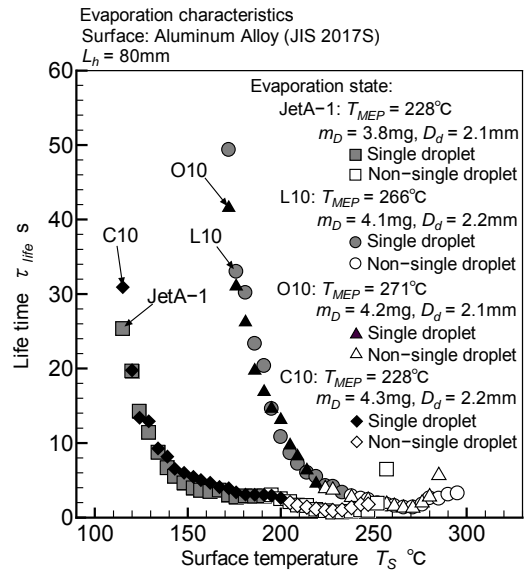
図 2 試験燃焼炉

試験燃焼炉は幅 570mm、高さ 770mm、長さ 2420mm の矩形炉で、燃焼炉出口には排ガス冷却用の水冷式熱交換器が設けられている。今回の実験では、図のように三つあるダンパーにより排ガスは熱交換器を通らずに直接煙道へ流れるように設定した。燃料には、藻類由来のバイオマス燃料の代替として、大量に入手でき脂肪酸組成の比較的明らかな市販植物油（オレイン酸含有量 80%）を灯油に 10wt%添加したものをを用いた。燃料流量を 0.84g/s として、空気比が 2.0 となるように燃焼用空気流量を設定した。燃料は 30°C に加熱してバーナに供給した。燃焼ガスのサンプリングは図中に示す燃焼炉出口付近のガスサンプリングポートで行った。サンプリングされた燃焼ガスは、排ガス分析装置 (HORIBA MEXA-4000FT) よりガス組成を分析した。排ガス中 PM の粒径分布は走査式モビリティパーティクルサイザー (TSI SMPS3034) により測定した。また、排ガス中の PM を石英フィルタ上に捕集し、その質量および組成 (Dry-soot, SOF, Sulfate) を、すす分析装置 (HORIBA MEXA-1370PM) により測定した。

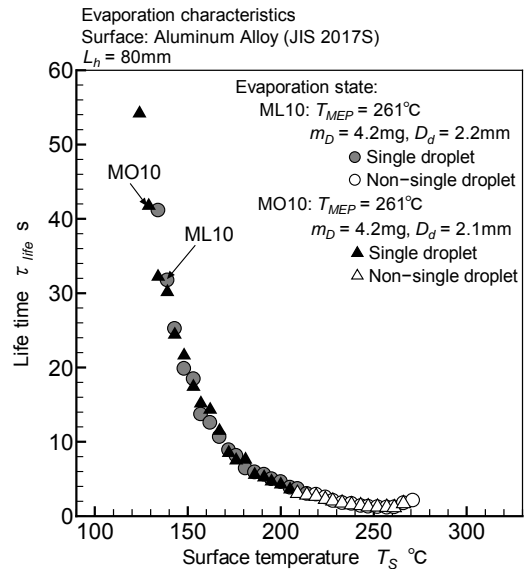
4. 研究成果

(1) 蒸発およびデポジット生成試験

図 3 に蒸発試験の結果を示す。図の横軸は壁面温度であり、縦軸は液滴寿命 τ_{life} である。また図中の JetA-1 はジェット燃料を、また L10 はリノール酸を、O10 はオレイン酸を、C10 はカプリン酸をジェット燃料に 10wt%添加した燃料を示し、ML10 はリノール酸メチルエステルを、MO10 はオレイン酸メチルエステルをジェット燃料に 10wt%添加した燃料を示す。



(a) JetA-1, L10, O10 and C10



(b) ML10 and MO10

図 3 各種燃料の蒸発試験結果

図中の m_d は単一液滴の質量であり、 D_d は単一液滴の直径である。また T_{MEP} は液滴寿命が最短となる最大蒸発率点温度である。また図中の黒塗りの記号は、液滴が単一液滴のまま蒸発を終了したことを示し、白抜き記号は蒸発の差異に液滴内部から激しい沸騰が生じ、壁面上で分裂して複数の小さな液滴になって蒸発したことを示す。

図 3 (a) より、リノール酸およびオレイン酸を添加した燃料の最大蒸発率点温度はジェット燃料より高くなり、蒸発しにくいことがわかった。またカプリン酸を添加した燃料の最大蒸発率点温度はジェット燃料と同じであった。また図 3 (b) より、リノール酸メチルエステルを添加した燃料とはオレイン酸メチルエステルを添加した燃料の最大蒸

発率点温度はそれぞれ対応する脂肪酸を添加した燃料より低下した。このことから、脂肪酸のメチルエステル化により、もとの脂肪酸より蒸発しやすくなることが明らかとなった。

図4にデポジット試験の結果を示す。デポジット試験は、壁面温度 T_s を 231°C、液滴の滴下間隔 τ_{imp} を 3s として行った。ただしジェット燃料については、この条件ではデポジットがほとんど生成しなかったため、壁面温度を 150°C として試験を行った。デポジットの質量は 1000 滴を滴下することに測定した。

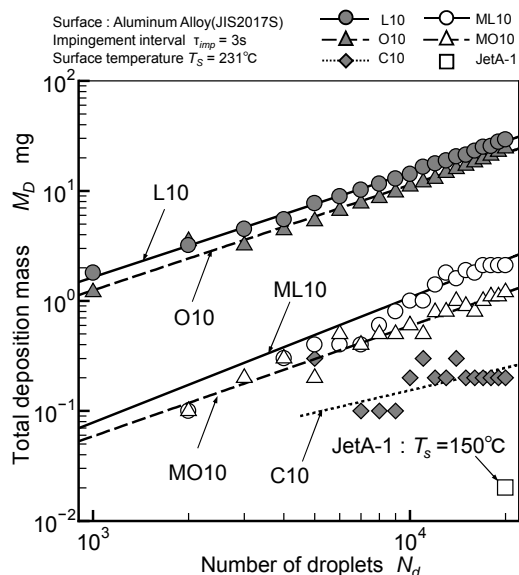


図4 デポジット試験結果

図の横軸は滴下液滴数を、縦軸はデポジット質量を示す。燃料によっては液滴数の少ないところでデータがないものがあるが、これは壁面上に堆積したデポジットがごく微量で、質量を測定できなかったためである。

この結果から、脂肪酸を添加することによりデポジット質量が増加することは明らかである。また、デポジット質量はリノール酸添加燃料 > オレイン酸添加燃料 > > カプリン酸添加燃料となっているが、これは脂肪酸分子中の二重結合の数（不飽和度）に対応していると考えられる。二重結合の数はリノール酸が2、オレイン酸が1、カプリン酸が0であり、分子中の二重結合の数が多いほどデポジット質量が多くなっている。二重結合は酸化されやすく、熱分解の際に開裂し、その結果デポジットが生成しやすくなると推察される。また、脂肪酸のメチルエステルを添加した燃料は、いずれも対応する脂肪酸を添加した燃料よりデポジット質量が大幅に減少している。このことから、脂肪酸のメチルエステル化はデポジット生成の抑制に有効であることがわかった。

以上の結果から、藻類由来のバイオマス燃料を添加した燃料は、蒸発速度が低下し、デポジット生成量が増加する可能性があるが、メチルエステル化することにより、それらを抑制できると推察される。

(2) 噴霧燃焼試験

燃焼排ガス中の NO と CO 濃度を表1に示す。

表1 燃焼排ガス中の NO および CO 濃度

	NO [ppm]	CO [ppm]
Kerosene	37	63
Kerosene +Vegetable oil 10wt%	38	58

植物油を添加しても燃焼排ガス中の NO と CO 濃度はほとんど変わらないことがわかる。

表2に燃焼炉内温度と煙道排ガス温度を示す。燃焼炉内温度は炉の上流端（図2のバーナが設置されている面）から 900mm、炉底面から 600mm の位置で炉壁から挿入した熱電対により、煙道排ガス温度は燃焼ガスをサンプリングした位置で煙道に挿入された熱電対によりそれぞれ測定した。

表2 燃焼炉内および燃焼排ガス温度

	Furnace [°C]	Exhaust gas [°C]
Kerosene	768	620
Kerosene +Vegetable oil 10wt%	772	626

燃焼炉内温度および燃焼排ガス温度についても植物油添加の影響は見られないことがわかる。以上の結果から、灯油に 10wt% 植物油を添加しても燃焼状況はほとんど変わらないことが確認された。

表3に燃焼排ガス中の PM 質量および組成を示す。表中の Total が分析で得られた PM の質量である。

表3 排ガス中 PM の質量および組成

	Dry-soot [mg/m ³]	SOF [mg/m ³]	Sulfate [mg/m ³]	Total [mg/m ³]
Kerosene	1811	143	44	1998
Kerosene +Vegetable oil 10wt%	1183	162	25	1370

表中の数値は燃焼排ガス 1m³ 中に含まれる質量 [mg] である。

PM 質量 (Total) を見ると、植物油を添加した灯油の場合には、添加しない灯油の場合の約 70% となっている。ディーゼルエンジンにおいてバイオマス燃料を使用した場合にも

排出 PM 量は減少する結果が報告されており、連続燃焼の場合にもバイオマス燃料の添加により減少することが明らかとなった。

PM の組成については、特に SOF (未燃炭化水素) の割合について、灯油の場合には PM 質量に占める SOF の割合が約 7% であるのに対して、植物油を添加した灯油の場合には約 12% となっており、絶対量も増加している。従って、植物油の添加による排出 PM 量の低減は主に炭素質成分である Dry-soot の低減によるものであるといえる。SOF 排出量の増加は植物油添加に起因すると考えられる。排出 PM 量の低減メカニズムについては、燃焼過程における PAH (多環芳香族炭化水素; PM の前駆物質であると考えられる) の生成挙動など、より詳細な検討が必要である。

燃焼排ガス中の PM の粒径分布を図 5 に示す。図の横軸は PM の粒径であり、縦軸は PM 個数であるが、燃料 1kg を燃焼させた場合の PM 個数に換算したものである。

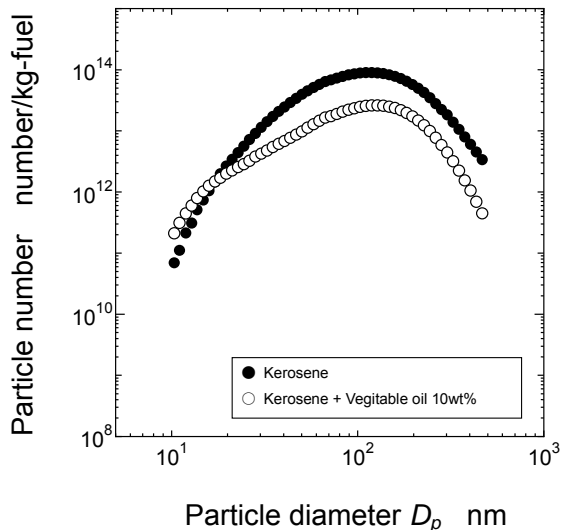


図 5 排ガス中 PM の粒径分布

粒子数が最大となる粒径はどちらの燃料でも 100nm 程度であり変わらないが、その個数は植物油を添加した灯油の方が先に示した排出 PM 質量の減少に対応して少なくなっている。特徴的なのは、10nm 付近の粒径の粒子数は植物油を添加した灯油の方が多くなっていることである。これは、未燃炭化水素の凝縮により生成した微粒子である可能性があり、先に示した SOF の増加と対応している可能性があるが、詳細は不明である。

蒸発およびデポジット試験結果より、植物油を添加した場合には蒸発速度の低下やデポジット生成量の増加が懸念されたが、噴霧燃焼試験結果より、燃焼状況はほとんど変わらず、排出 PM 量も減少することが明らかとなった。5 時間の連続燃焼の後、バーナ出口や燃料噴霧ノズルを確認したが、デポジット

の付着はほとんど見られなかった。以上の結果から、藻類由来のバイオマス燃料を添加した燃料は、噴霧燃焼特性もほとんど変わらないが、排出 PM 量は減少し、さらに燃焼装置の不具合もほとんど生じないものと推察される。

今後は、より高負荷での燃焼試験を行い、特にバーナ等へのデポジットの生成などについて確認することが必要である。また、バイオマス燃料使用時の PM 生成量の低減メカニズムについて、燃焼過程における PAH の生成挙動や温度分布、主要化学種濃度分布との関連など、より詳細な検討が望まれる。

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 1 件)

① 八田真仁、大森剛茂、座間淑夫、古畑朋彦、新井雅隆、各種脂肪酸またはエステルを添加したジェット燃料の高温壁面上におけるデポジット生成特性、日本機械学会論文集 (B 編)、査読有、78 巻 793 号、2012、pp. 1620-1629

〔学会発表〕(計 1 件)

① 八田真仁、大森剛茂、座間淑夫、古畑朋彦、新井雅隆、各種脂肪酸またはエステルを添加したジェット燃料の高温壁面上におけるデポジット生成特性、第 22 回内燃機関シンポジウム、2011. 11. 29、東京工業大学蔵前会館 (東京都)

〔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：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：