

実走行リアルタイムオンボード計測による バイオディーゼル燃料の排気特性*

羽原輝晃*1, 千田二郎*2

Engine Emissions of Diesel Vehicle Operated with Biodiesel Fuel Using of Real-Time On-Board Measurement System

Teruaki HAIBARA, Jiro SENDA

Biodiesel fuel manufactured by waste cooking oil has been coming to be used well. In the experiments, the biodiesel fuel was used for the truck, which carried on DI diesel engine, and exhaust gas was measured. It was measured by real time on-board system by actual running. The examination was practiced at the different season, and the affection that influenced to the exhaust character the change in the season such as temperature and humidity was investigated. In winter, the test was carried out by two ways, one of them is start with engine without warming up (cold start), other is starting with engine warmed up (hot start).

Key Words Alternative fuel, Diesel engine, Biodiesel fuel, On-board measurement system

1. 緒 論

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇問題から、代替エネルギーの開発や使用が盛んに行なわれている。そのフィールドは企業から自治体レベルに至るまで多方面に及んでおり、その際、キーワードとして共通するのが「脱化石燃料」、「環境調和型エネルギー」、「資源循環型エネルギー」などである。日本においては使用済みの食用油（廃食油）の後処理問題の解決策として、近年、廃食油の燃料化に関する研究が行なわれてきた。この方式は日本独自のものであり、廃食油処理にかかる環境負荷の低減に効果がある。植物油を利用する大きな利点としては、燃料として浪費した後の二酸化炭素が再び植物に還元されるサイクル（炭素循環性）を形成することである。京都市では廃食油をメチルエステル交換し、バイオディーゼル燃料(BDF)として市バスやごみ収集車の燃料に利用している。また和歌山市においては、回収した廃食油に灯油を混合することでバイオ燃料(i-BF)として利用している。これらの廃食油を含む燃料を使用することで、ディーゼル車から排出されるすすの低減に大きな効果があることが知られている。そこで、本研究では直噴式ディーゼルエンジン搭載の車両にこれらの燃料を使用し、オンボードで

の排出ガス計測を行ない、各燃料の排出ガス特性を把握する。直噴式エンジンの場合、燃料が直接燃焼室内に噴射されるので、副室式に比べ空気との混合が促進されにくく、燃料の性状が燃焼状態に大きく寄与する。バイオディーゼル燃料は、従来の燃料である軽油と比べると、粘度や揮発性状が大きく異なるため、その排気特性について詳細に調べる必要がある。また、吸入される空気の状態(温度、湿度)が燃焼状態に影響を与えるとも考えられる⁰⁾。そこで、実走行試験を夏季、秋季、冬季に行ない、各燃料の比較および、季節による気候の変動が排気特性に及ぼす影響を調べた。

2. 供試燃料

本研究では、廃食油を原料とする2種類のバイオディーゼル燃料を用い、走行試験を行なった。

2.1 バイオディーゼル燃料の製造方法および過程

廃食油そのものは、粘度が軽油の10倍程度と高く、セタン価が低いためディーゼル燃焼における着火性が悪く、既存のディーゼル機関での使用には適していない。そこで、京都市および和歌山市で使用しているバイオディーゼル燃料は、以下の各方法により燃料性状の改質が行なわれている。

(1) 京都市のバイオディーゼル燃料

京都市のバイオディーゼル燃料は、市内のモデル地区の家庭、レストラン等から回収した廃食油をエ

*1同志社大学大学院 (610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

*2同志社大学

ステル化し、着火性および粘度を軽油並みの燃料に改質している。回収された廃食油は前処理として、廃食油中の水分および夾雑物を除去する。次に、メタノールおよびアルカリ触媒として水酸化カリウムを加え、メチルエステル交換処理を2度行なう。これにより、廃食油 BDF となる粗メチルエステル層とグリセリン層をより高純度で分離させることが可能となる。最後に粗メチルエステルを温水洗浄した後、水分および夾雑物を除去する。以上の工程を経て精製されたメチルエステルを B100 と呼び実際に京都市で使用しているバイオディーゼル燃料である。

京都市では、この B100 を清掃車に、また Gas oil と B100 を混合体積分率で 80 対 20 の割合で混合した燃料(B20)を市バスの代替燃料として使用している。

(2) 和歌山市のバイオディーゼル燃料

和歌山県内の運送業者やバス会社で使用しているバイオ燃料(i-BF)の製造工程を以下に記す。食品工場や飲食店などから回収した廃植物油から不純物を取り除き、精製植物油を軽油並みの粘度に調整するために、灯油と精製植物油を混合体積分率で約 70 対 30 の割合で混合する。この工程により得られる燃料(i-BF)を代替燃料として実際に使用している。

2.2 バイオディーゼル燃料の特徴

表 1 に Gas oil, B100 および i-BF の性状を示す。各バイオディーゼル燃料は Gas oil に対し、動粘度が約 2 倍と高いが、セタン指数がほぼ同等で、硫黄分が非常に少なく、また燃料中に酸素原子を有する含酸素燃料という特徴を有する。特に、B100 に関しては、高沸点・低揮発性の燃料である。また i-BF は、燃料中の灯油成分の影響が大きく、他の燃料に比べると、蒸発性が良い。

Table 1 Fuel properties

| | Gas oil | Bio diesel fuel (B100) | i-Bio fuel (i-BF) |
|--|-------------|------------------------|-------------------|
| Density [kg/m ³] | 832 - 838 | 885.8 | 825 - 830 |
| Kinetic viscosity [mm ² /s] | 2.8 | 4.758 | 3.2 - 4.5 |
| Cetane Index | 55 - 56 | 51 | 52 - 54 |
| Flash point [K] | 332 - 341 | 461 | 322 - 323 |
| Distillation T10 [K] | 488 - 498 | 606 - 616 | 451 - 463 |
| Distillation T50 [K] | 548 - 558 | 609 - 619 | 480 - 518 |
| Distillation T90 [K] | 605 - 618 | 628 - 641 | 581 - 598 |
| Clog point [K] | 264 - 271 | 269 | 231 - 232 |
| Carbon [mass%] | 86.7 | 77.1 - 77.9 | |
| Hydrogen [mass%] | 12.8 | 11.7 - 11.8 | |
| Oxygen [mass%] | - | 11.1 - 11.2 | |
| Sulfur [mass%] | 0.02 - 0.05 | 0.0003 | 0.002 - 0.020 |
| Calorific value [MJ/kg] | 44.5 - 45.5 | 37.7 | 44.0 - 45.0 |

3. 実験方法

3.1 試験車両

各種センサを試験車両に取り付けた際のシステム構成を図 1 に示す。排出ガスを計測するため、試験車両には光透過式スモークメータ（堀場製作所, MEXA-130S）、直挿型 NO_x 分析計（堀場製作所, MEXA-120NO_x）、直挿型空燃比計（堀場製作所, MEXA-700λ）、加熱型 THC 測定装置（堀場製作所, MEXA-1170HFID）、加熱型 CO, CO₂ 測定装置（堀場製作所, MEXA-1170HNDIR）を搭載した。試験車両の走行状態を把握するため、速度およびエンジン回転数は車両から出力される情報を直接取り出した。エンジンルーム内の燃料温度、エンジン冷却水温度、エンジンオイル温度、クランクケース内温度および排出ガス温度の測定には熱電対を用い、大気温度および湿度の測定には、乾球・湿球温度計として白金抵抗体を使用した。さらに、エンジン吸入空気口にカルマン流量計、温度・湿度センサを取り付け、吸入空気量、温度、湿度を測定した⁽²⁾。さらに、GPS センサを荷台の上に取り付け、高度を含めた位置情報の把握を可能にした。走行試験において、

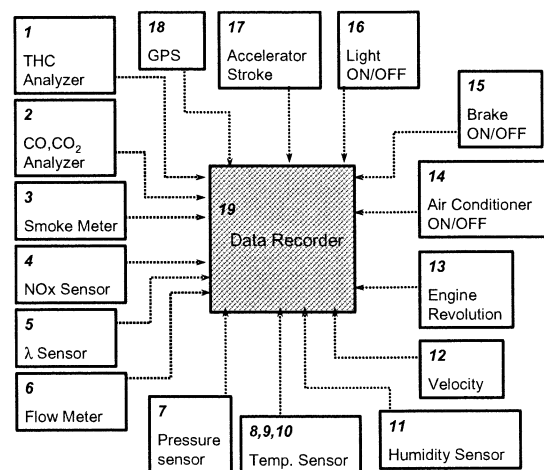
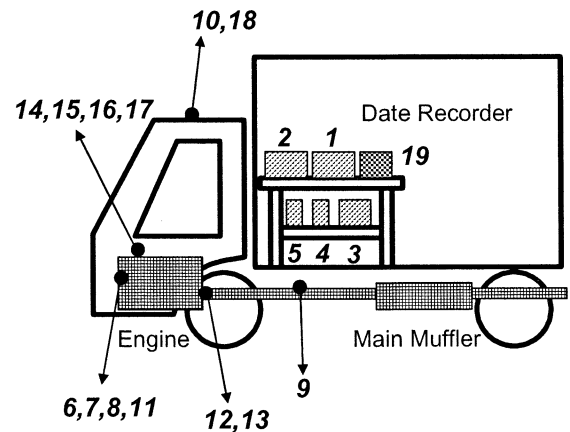


Fig.1 Configuration of on-board measurement system

各計測器で測定されたデータはデータレコーダ（京都エスアール，KSR-600）により，0.5秒毎に記録した。また，計測器の電源をまかなうため，発電機を搭載した。

3.2 実験条件

季節の変化が排出ガスに与える影響を調べるため，実験は夏季，秋季，冬季の晴れの日を選んで行なった。表2に実験を行なった日の気候条件を示す。この表が示すように，夏季は，高温多湿な気候条件であるのに対して，冬季は低温で湿度が低い条件であるといえる。走行スタート前には少なくとも20分以上の暖機運転を行ない，エンジンオイル，冷却水温度が十分上がりきった状態で試験を開始した。同志社大学周辺の一般道路をテストコースとし，コース中には市街地走行，高速道路走行を含む。スムーズに運転できる区間は速度がほぼ一定となるよう運転を行ない，できるだけ同条件での運転となるよう留意した。また，冬季においては，走行前の暖機運転を行わず，エンジン始動後すぐに走行するコールドスタートと暖機後に走行するホットスタートでの排気特性の比較も行なった。

4. 実験結果および考察

4.1 燃料の違いによる各種排ガス排出量

図2に，各季節での市街地走行，高速走行での各種排ガス排出量を示す。なお，PMの排出量は吸光度K[l/m]で表わし，Kの値はPM濃度を示すものである。その他の排出ガスは単位出力当たりの排出量で表し，機械性能を一定とした場合の燃料間での比較を行なった。

NO_x排出量に注目すると，高速走行よりも市街地走行の方が多く排出している。これは，発進，停止を多く繰り返すためであり，発進時には負荷が大きく，また，燃料の噴射量も急に増加するので，そ

の際に多くのNO_xが排出された。また，バイオ燃料の使用により，NO_x排出量が増加したのは，バイオ燃料の体積弾性率が軽油に比べ高いために，燃料噴射時期が早期化したためと考えられる。また，バイオ燃料の発熱量の低下によって，より多くの燃料が投入された結果，NO_xの増加に繋がったと考えられる。PM濃度においては，市街地走行より高速走行の方がPM濃度は大きい。また，どちらの区間においてもバイオ燃料を用いることでPMの低減効果が見られる。これは，バイオ燃料中に含まれる酸素成分の働きによるものである⁹⁾。次に，不完全燃焼が起因して排出されるCO排出量およびTHC排出量においては，高速走行よりも市街地走行で多く排出されている。CO,THCが多く排出されるのは，発進，加速時などの急なアクセルの踏み込みが行なわれるところであり，停止，発進を繰り返す市街地では多く排出される。また高速走行においては，ア

Table 2 Experimental condition

| Summer | Weather | Air temperature [deg.] | Absolute humidity [g/m ³] | Distance [km] | Average speed [km/h] |
|---------|---------|------------------------|---------------------------------------|---------------|----------------------|
| Gas oil | sunny | 32.0 | 20.43 | 26.78 | 34.71 |
| B20 | sunny | 29.9 | 23.74 | 26.81 | 36.10 |
| i-BF | sunny | 32.6 | 20.29 | 26.80 | 34.06 |
| B100 | sunny | 31.7 | 21.21 | 26.81 | 35.49 |
| Autumn | | | | | |
| Gas oil | sunny | 16.7 | 9.48 | 26.54 | 34.91 |
| B20 | sunny | 16.5 | 10.10 | 26.70 | 34.44 |
| i-BF | sunny | 14.3 | 9.17 | 26.68 | 33.70 |
| B100 | sunny | 16.4 | 9.67 | 26.73 | 34.01 |
| Winter | | | | | |
| Gas oil | sunny | 3.4 | 6.20 | 26.76 | 34.50 |
| B20 | sunny | 5.8 | 7.24 | 26.75 | 28.55 |
| i-BF | sunny | 7.7 | 7.20 | 26.74 | 31.29 |
| B100 | sunny | 7.2 | 6.62 | 26.74 | 33.41 |

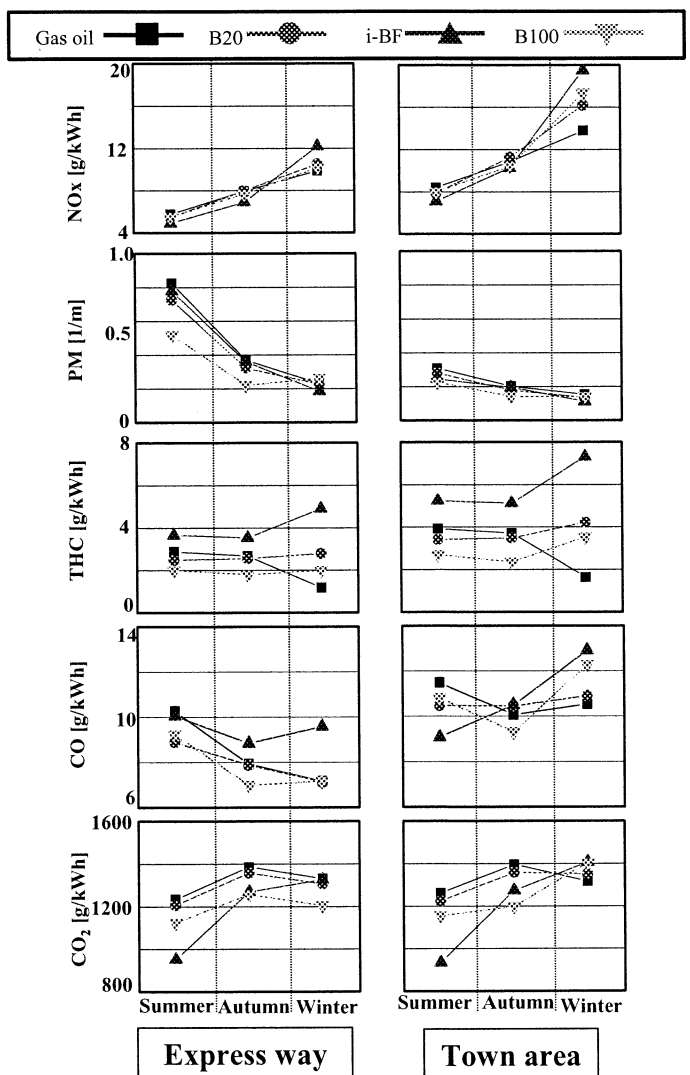


Fig.2 Average of emissions and fuel consumption compared with variety of seasons

クセルの踏み込みが大きく、噴射される燃料が多いため、この区間でも多くのCO,THCを排出していると考えられる。i-BFを除いて、BDFの使用によりCO, THC排出量はGas oilと比べると減少している。また、CO₂排出量に注目すると、どちらの走行状態においても、バイオ燃料の使用によりGas oilに比べ排出量は減少していることが分かる。

4.2 季節の変化による各種排ガス排出量

次に、図2において、各種排ガス排出量を夏季、秋季、冬季と比較する。NO_x排出量については、冬季、秋季、夏季の順に多く排出されている。また、冬季の市街地走行では燃料間の差が大きく、BDFの使用によりNO_xが増加している。これは、表2に示したように、冬季は気温が低く、絶対湿度も低いいため、空気中の水蒸気が少ない。このため吸入空気の熱容量が小さくなり、燃焼室内の温度が他に条件に比べて上昇しやすい。そのため、燃焼温度の上昇からNO_xが多く排出されたと考えられる。また、この条件でi-BFの排出量が一番多いのは、i-BF中の灯油成分の影響が大きいと考えられる。灯油は軽油に比べ蒸発しやすく、着火にいたるまでにより多くの燃料蒸気が形成される。その後着火することで、予混合的な燃焼が活発となり、NO_xも多く生成されたと考えられる。一方、PMの排出量は、NO_xとは逆の傾向を示し、夏季、秋季、冬季の順にPM濃度は大きい。一番多くのPM濃度が測定されたのは、夏季の高速走行であるが、B100, B20, i-BFのバイオ燃料を使用することによりGas oilに比べPM濃度は小さくなっている。ここで、表3に、今回の実験中における、燃料温度、空気過剰率、充填効率の平均値を季節ごとに示す。これらの条件は排気特性に大きく影響を与えると考えられる。この表から、夏季は気温、湿度が高いため、空気過剰率や充填効率が低下し、燃焼に使用される空気量が減少したため、PMが生成されやすい状態となった。しかしながら、廃食油中の酸素成分の効果によって、BDFやi-BFのエンジン燃焼室内の理論空燃費が低下し、

空気量の低下を補うことが出来る。その結果、バイオ燃料を使用したことでPMの低減に繋がったと考えられる。次に、CO,THC排出量については、B100やi-BFの冬期での排出量が、他の季節よりも多い。THCについては、i-BFがいずれの季節、走行状態について多く排出している。とくに冬季の市街地において、B100, i-BFのTHC, CO排出量が大幅に増加している。バイオ燃料は粘度が高く燃料噴霧の微粒化が促進されない。また、表3に示すように、冬季での燃料温度が低いことも原因となって、粘度が低下せず、燃料噴霧と空気との混合が促進されず、THCやCOなどの未燃の成分が多く排出されたものと考えられる。CO₂の排出量に関しては、冬季、秋季、夏季の順に多い。このことは、燃焼における吸入空気の状態が冬季、秋季、夏季の順に良く、燃焼が促進されているといえる。夏季においては、i-BFのCO₂排出量はどちらの区間においても少なかったのに対し、秋季、冬季の排出量は他の燃料と同様の排出量となった。

4.3 コールドスタート、ホットスタートの比較

各燃料の冷間時における、コールドスタート時の排出ガスに与える影響を調べる為、冬季では、暖機なしの状態から実験を行なった。図3にコールドスタートとホットスタートでのPM濃度とTHC排出量の走行距離との履歴を示す。PM, THCともコールドスタート時ではホットスタート時よりも多く排出されている。特に、PMに関してB100ではホットスタート時との差が大きく、ホットスタートではPMの低減効果があるが、コールドスタートの場合、Gas oilよりも多くのPMを排出していることが分か

Table 3 Average of experimental condition

| | Fuel temp. [deg.] | Excess Air Ratio | Charging efficiency [%] |
|--------|-------------------|------------------|-------------------------|
| Summer | 48.3 | 4.03 | 68.0 |
| Autumn | 38.3 | 4.93 | 72.0 |
| Winter | 28.3 | 7.64 | 73.8 |

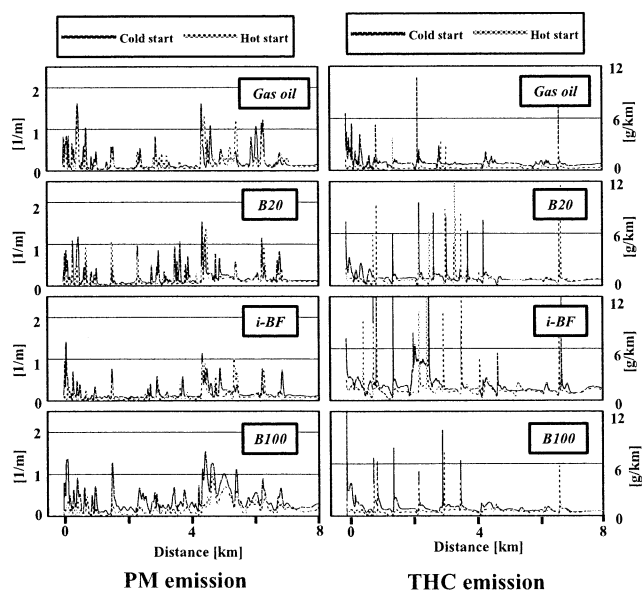


Fig.3 PM and THC emissions profile of cold start and hot start

る。また THC においてもコールドスタート時の排出量はホットスタート時の排出量と比べて大きい。図4にスタートしてから市街地区間における各種排出ガスの平均排出量と燃料消費率をコールドスタート、ホットスタートで比較した。どの排出ガスもコールドスタートでの排出量が多く、燃料消費率も高い。特に PM, THC, CO などの不完全燃焼が原因とされるガスに関してはホットスタートとの差が大きい。またこの傾向は BDF を含む燃料において顕著に見られる。特に B100 においてはコールドスタート時の燃料消費率が他の燃料より突出して高いにもかかわらず、CO₂ 排出量が他の燃料と同等である。これらのことから、B100 の不完全燃焼によって多くの PM, THC, CO が排出されたと考えられる。

5. 結言

直噴式ディーゼルエンジン搭載の車両にバイオディーゼル燃料を使用し、季節による排気特性の評価と、コールドスタート時のエミッションについてホットスタート時と比較を行なった。以下に、本研究より得られた知見を示す。

- (1) 気温、湿度が低い条件では、燃焼状態が良く、PM が減少し、逆に NO_x は増加する傾向にある。
- (2) 低温、低湿な条件での、NO_x の増加において、i-BF の増加が著しいのは、灯油成分の働きによるためである。
- (3) 高温、多湿な条件では PM が多く排出されているが、BDF を使用することで、大幅な低減効果がある。

- 果がある。
- (4) 冬季における、コールドスタートでは、B100 を用いても PM の低減効果が期待できない。

謝辞

本研究の遂行にあたり、京都市環境局、(株)レボインターナショナル、(株)石橋石油の方々および文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」から多大なる支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 木原信隆, 塚本時弘: 車載型分析システムによる NO_x 排出量のリアルタイム計測, 自動車技術会前刷集, No.23-00, p.13-16
- (2) 奥井伸宜ほか: 実走行におけるバイオディーゼル期間の性能および排気特性, 自動車技術会前刷集, No.48-03, p.1-4
- (3) 奥井伸宜ほか: 直噴式ディーゼル機関内における廃食用油バイオディーゼル燃料噴霧の燃焼機構および火炎内すす生成機構に関する基礎的研究, 自動車技術会前刷集, No.63-04, p.1-4

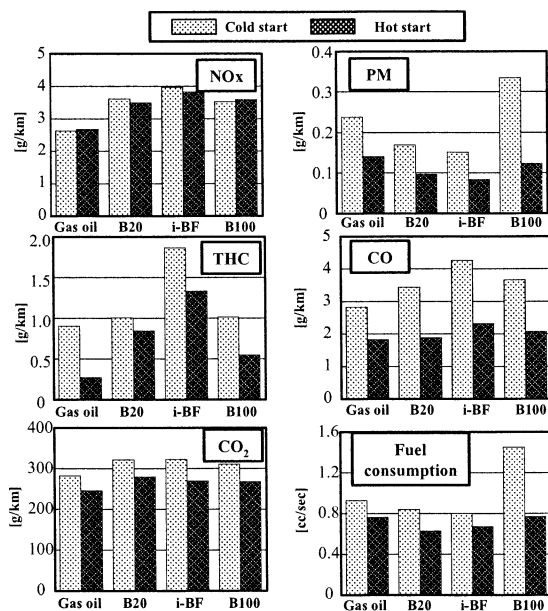


Fig.4 Average of emissions at cold start and hot start