可視化によるディーゼル機関の 重質油燃焼に関する研究*

高 崎 講 二** 福 吉 正**
阿 部 重 信** 長 船 信之介***

Visual Study about Combustion Characteristics of Heavy Fuel in Diesel Engines

By koji Takasaki, Tadashi Fukuyoshi, Shigenobu Abe, Shin-nosuke Osafune

Bunker fuel oil, which mainly consists of residue from crude oil refining process, is commonly used for stationary and marine diesel engines. In spite decreasing quality of bunker fuel oil during last years, higher combustion efficiency and lower emission must be achieved. Up to today, ignition quality was the only criterion for combustion characteristics of such fuels. Therefore, contrary to gas oil, formation of the fuel spray and combustion process were not examined in detail. These are clarified in this paper, based on results from engine trials and visualization of fuel spray combustion. Further, methods to improve combustion are discussed.

1. は じ め に

船用、定置用などシリンダ径が約200mm以上の機関では、バンカー油（C重油）と呼ばれる原油精製残渣を基油とする重質油が用いられている。近年それらはますます重質化する傾向にあり、その高効率、低公害燃焼の開発は時代の急務である。

しかし、従来こういった燃料の燃焼特性評価は着火性が主で、噴霧の形成や燃焼の過程は軽油ほど十分に解明されておらず、そのため燃焼技術の開発も試行錯誤的にならざるを得なかった感がある。

本研究では、シリンダ径200mmの実機運転データからバンカー油の排気エミッション上の問題点を探ると同時に、同じような大きさの急速圧縮装置や可視化機関を使用して噴霧の形成や燃焼の過程を観察し、その結果を基に燃焼改善技術の検討を行った。さらにKIVAコードを使った噴霧挙動の数値解析から、この問題に関する今後の研究の指針を求めた。以下に詳細を述べる。

* 原稿受付 平成9年11月10日

** 正会員 九州大学・大学院（春日市春日公園6-1）

*** 正会員 三菱重工業株式会社（長崎市深堀町5-717-1）

2. 実験の装置と方法

2.1 実験機関および燃焼可視化装置 運転実験に使用した機関は、文献(1)に詳細を示すシリンダ径200mmの中速機関（M-200機関と称する）で、その主要目を表1に示す。本機関でのデータは、著者の一人がハノーバー大学（ドイツ）にて実験したものである。

燃焼の可視化実験では、始めに文献(2)に詳細を示す急速圧縮装置を使用して、単一燃料噴霧の非蒸発部と蒸発部の観察を行った。この装置のシリンダ径は135mmであるが、燃焼室端部から燃料噴

表1 運転実験機関（M-200機関）の主要目

Test engine	M-200
Engine type	4-stroke, DI, Turbo- charged
Number of cylinders	3 (6)
Cylinder bore D (mm)	200
Piston stroke S (mm)	270
Max. power /cyl (kW)	85
Engine speed (rpm)	1000
Max. Pme (bar/MPa)	12 / 1.2
Fuel inj. nozzle	5×0.30mm +4×0.26mm

射を行って中速機関の燃焼室の半分を模擬している。

また燃焼室内噴霧火炎の直接撮影には、やはり文献(2)に詳細を示すシリンダ径190mmの可視化用の2ストローク中速機関（可視化機関と称する）を使用した。

高速度撮影時には、確実に設定温度に加熱されたバンカー油が噴射されるように、前もって噴射ノズル先端までバンカー油を循環させるシステム⁽²⁾を使用した。

以上のM-200機関、急速圧縮装置、可視化機関の燃焼室形状は、それぞれの実験結果の図の中に示している。

2.2 燃料 燃料として、表2に性状を示す軽油（Gas Oil, GOと略す）とバンカー油（Bunker Fuel Oil, BFOと略す）を使用した。バンカー油は使用時には約105℃に加熱し、燃料ポンプ入口で粘度が20mm²/sとなるようにした。急速圧縮装置では、やはり表2に性状を示す船用ディーゼル油

（Marine Diesel Oil, MDOと略す）を軽油の代わりに使用した。

図1に3種類の燃料の大気圧下での留点分布を示す。軽油とMDOには大きな差が見られないが、バンカー油は50%以上の残渣分（斜線部）を含んでいることが分かる。

2.3 排気エミッション測定方法 M-200機関におけるNO_x、CO、HCの測定は、自動車用ディーゼル機関と同様の装置で行った。さらに燃料消費率と排気中のO₂濃度から排気ガス流量を算出し、ガス濃度（ppm）の測定値をg/kWhに換算した。排気煙（スモーク）濃度はボッシュスモークメータにより測定し、ボッシュユニット（BSU）で表示した。また排気微粒子（PM）を、直接サンプリング法によるフィルター重量の変化⁽³⁾から測定した。

3. 実験の結果と考察

3.1 排気エミッション測定結果 M-200機関の発電機特性と船用特性での運転結果を図2に示す。バンカー油（BFO）と軽油（GO）での結果を比較すると、以下のことが明らかになる。

- ・NO_x、CO、HCについては、バンカー油の方が排出が多いとは認められない。
- ・両燃料の最も顕著な違いとして、バンカー油では軽油の3倍以上の排気微粒子（PM）が排出され、特に低負荷の方で多く排出されている。
- ・BSUで表示した排気煙濃度については、バンカー油の方が高くなってはいるが、軽油との差はPMのデータほど大きくはない。

微粒子PMはDry SootとSOFから構成されるが、排気煙濃度のBSU値はDry Soot量と相関が深い。バンカー油を使用した場合、BSU値の増加よりPM値の増加が際立っているのは、特にSOFの排出が多くなったためと予想される。

PMの増加については、バンカー油に含まれる硫黄分の影響はもちろん考えられる。しかし図2で、低負荷の方がPM排出が多いことなどはこれだけでは説明できない。そこで次に噴霧燃焼の可視化解析を行って、バンカー油の燃焼上の問題点を明らかにしていく。

3.2 重質油噴霧の蒸発特性 噴霧燃焼の可視化解析の始めとして、急速圧縮装置を使用して

表2 供試燃料油の性状

Fuel	Gas Oil	Marine Diesel Oil	Bunker Fuel Oil
Density (15℃) kg/m ³	830~833	843	974
Kinematic Viscosity (60℃) mm ² /s	2~2.5	2.5	177
Sulfur %	0.15~0.2	0.8	2.3
Residual Carbon Wt %	0~0.1	0.1	13.4
Lower Calorific Value kJ/kg	42700~43000	42500	40740

図1 供試燃料油の留点分布

図2 運転実験結果(バンカー油と軽油の比較)

噴霧の非蒸発部の観察を行った。図3に結果を示す。これは燃焼室の側方から撮影したもので、窓の幅は110mmであるが、前述したように燃焼室端部に噴射ノズルを設けて中速機関の燃焼室の半分を模擬している。ここでは2種類の光学的撮影方法が適用され、シャドウグラフでは非蒸発部・蒸発部を含む噴霧全体の輪郭が、背景散乱光（Back Diffused Light）写真では非蒸発の液相部のみが撮影されている。図3(a)は軽質燃料油としての船用ディーゼル油（MDO）、(b)はバンカー油（BFO）による結果である。

(a) (b) のシャドウグラフを見ると明らかなように、両燃料とも噴射開始後約1msで噴霧はピストン上面に衝突し、その後は面に沿って発達する。燃料の違いをさらに詳細に観察してみる。(a) (b) を比較すると、(a) MDOはピストン上面に沿って発達する際に噴霧上部の起伏が多く、16mm フィルムを流して見ると、これらの起伏は噴霧の進行方向と逆方向に（反時計回りに）巻いている渦であることが理解できる。(b) バンカー油ではそれに比べ噴霧の厚みが薄くて偏平に見え、2ms付近では噴霧先端がMDO噴霧よりわずかに進んでいることが認められる。

一方、背景散乱光写真で両燃料の非蒸発部（液相部）を比較すると大きな違いが見られる。(a)MDOの背景散乱光写真で認められる非蒸発部の長さは、噴射開始後0.6~0.8msで40mm程になるが、その後はそれ以上成長しない。シャドウグラフの結果と組み合わせると、MDOは噴射ノズルから約40mm進む間にすべて蒸発し、その後はガス噴霧となって発達していることが理解できる。それに対し(b)バンカー油の背景散乱光写真では、非蒸発部は衝突後もピストン上面に沿って進展し、噴霧の先端位置まで非蒸発部が存在することが理解できる。

着火は(a)MDOでは噴射開始後1.8ms, (b)バンカー油では2.2msで起きている。バンカー油ではむしろ非蒸発部の下側から着火が起きているように見える。図3中(b)の下に、ピストンの下側から撮影したバンカー油の着火の状況を示す。これによると着火は噴霧の周辺部から起きている。

ここでの燃烧室内空気圧力・温度（4.6MPa, 420℃）は高過給機関の常用負荷より低く、図3はそのような機関の低負荷に相当する結果とも言える。ここでは空気圧力が低いと空気密度も低く、その中を進む噴霧の速度は速くなる。さらに空気温度が低いと着火が遅くなり、上に述べたバンカー油の非蒸発部の衝突の可能性が増大する。

もちろん、着火後は火炎温度により非蒸発部も蒸発、燃焼するが、低温のピストン上に付着した非蒸発燃料がPM発生の一因となることは十分考えられる。このことは、図2において低負荷の方がPM値が高くなることもとも符合している。

3.3 重質油噴霧の燃焼特性

図4に、可視化機関の燃焼室下方から直接撮影した噴霧火炎の

図3 MDO (A重油) とバンカー油噴霧の蒸発特性の違い (急速圧縮装置)

燃焼状況を示す。ここで(A)～(G)の7ケースの条件について通して説明する。(A)は軽油噴霧の燃焼を、(B)は同じ条件でバンカー油噴霧の燃焼を撮影し、燃料による比較を行ったものである。(C)以下では、(A)(B)より高い空気圧力の下でバンカー油噴霧燃焼を撮影している。内訳は、(C)(D)は燃焼時の空気温度の影響を比較したもの、(E)～(G)は、バンカー油燃焼に対する空気スワールや燃料噴射条件(噴口径、噴口数、噴射圧力)の影響を調べたものである。

3.3.1 軽油との比較 始めに図4(A)(B)から燃料による違いを観察してみる。(A)(B)とも最も左側の写真は、着火直後の火炎の状況を撮影したものである。ここでは、クランク角度で軽油で約5度、バンカー油で約6度の着火遅れを経て着火している。(B)のバンカー油の写真では、各噴口からの噴霧の着火状況に大きなばらつきが見られる。これも着火性の悪さに起因するものと思われる。

それ以降、ATDC5～6度および10度における(A)(B)の比較では、透明ピストン上の噴霧の衝突

位置で生成されるスートに違いが見られる。高速でフィルムを流してみると、このスートは燃料噴射期間中にこの位置で生成と消滅を繰り返し、燃料噴射が終了するとその位置からも消滅する。すなわち、燃料過濃な噴霧がピストンに当たって冷却され一旦スートを生成するが、すぐに後続の噴霧によって外周部に押し出され、空気に触れて再燃焼することを繰り返しているものと思われる。(A)(B)の比較では、(B)のバンカー油の方が明らかにこのスートは多く、噴霧内の燃料・空気の分布が軽油より不均一なため燃料過濃な領域が大きいことを伺わせる。3.2で述べたように、この不均一はバンカー油中の残渣分のもつ低い蒸発性に起因するものと思われる。

3.3.2 空気温度の影響 バンカー油噴霧の低い蒸発性については、図4(C)(D)の写真からも伺うことができる。(C)(D)は着火時の空気温度(T_c)の影響を比較したものである。燃料噴射期間中のATDC8度では(C)(D)に差は見られないが、噴射の終了したATDC26度では、(D)の場合だけ各噴霧の

図4 バンカー油噴霧火炎の燃焼状況 (可視化機関)

衝突位置に特に白い輝炎を生じている。これは噴射時の空気温度が400～420℃と低いため噴霧の蒸発も熱分解も進まず、さらに着火遅れが長いこととの相乗効果でピストン面上に衝突、付着する非蒸発燃料の量が多く、噴射終了後もその位置で燃焼が続いている結果と想像される。このような状況は、実機ではやはり低負荷で起こりうるものと

思われる。

3.3.3 スワールの影響 次に重質油燃焼を改善するいくつかの方策を検討する。(E)は可視化機関の掃気ポートに角度を付けて、スワール比で約2.5のスワールを与えた場合を示す。それ以外の条件は(C)と同じである(図4中、(E)以外はスワールを与えていない)。ATDC8度では(E)の方が(C)よ

り燃焼は活発に見えるが、噴射の終了するATDC18度では逆に(E)の方が噴霧の衝突位置にスートが多く残っており、またATDC26度では燃焼室全体に紐状のスートが多く残っている。このように後燃え時まで残ってしまったスートは、再燃焼できずそのまま排出されることが多い。これがもし実機ならば、排気煙濃度の悪化に至っているものと予想される。

今回この条件で軽油の方を撮影していないため結論を出すに至らないが、筆者らの過去の実機テストによる研究⁽²⁾でも、バンカー油の方が軽油より小さなスワール強度でオーバースワール状態(排気煙濃度の急激な悪化)に陥るという結果を得ている。このことに加え(E)の写真からも、バンカー油ではピストン上に付着した非蒸発部に隣からの火炎が重なり、燃焼悪化に陥りやすいことが予想される。ただしオーバースワールにならない範囲では、スワールがバンカー油噴霧の燃焼を改善することも確かめられている⁽²⁾。主にバンカー油を使用する機関では、バンカー油に合ったスワール強度を選択していく必要がある。

3.3.4 噴口数の影響 次に図4(F)と(G)の写真で、バンカー油燃焼に対する燃料噴射条件(噴口径、噴口数、噴射圧力)の影響を検討してみる。噴口径を小さくする方が、同じ噴霧の到達距離で噴霧内の空気過剰率を高くできることはよく知られている⁽⁴⁾。(F)はこれまでの0.23mmの噴口径を0.19mmに小さくし、噴口総面積を維持するために噴口数を12孔にした場合の火炎写真である。

この写真のATDC8度では、各噴霧の衝突位置のスートは(C)～(E)の写真より少なく見える。しかしその後ATDC26度では、(E)のオーバースワールの場合と同様に紐状のスートが燃焼室全体に観察される。これは、(ここではスワールを与えてはいないが、)12本の噴霧が多すぎて火炎同士の重複が起こったものと想像される。

3.3.5 噴射圧力の影響 最後に(G)は、噴口数は8孔のままで噴口径を小さくした結果である。噴口総面積はこれまでの約60%にまで減少し、その結果、燃料噴射圧力はこれまでの1000barから1500barへ上昇し、ただし噴射期間は22度(クランク角度)から32度へ延びている。写真だけからは、この(G)が図4の中で最も良好な燃焼状態を示すように見え、衝突位置におけるスートも他の写

真に比べて激減している。小噴口径と高噴射圧力の組み合わせは、バンカー油燃焼に対しても有効な燃焼改善策であることが理解される。ただしこの場合は噴射期間が極端に長いため、燃焼期間もそれに応じて長くなっていることが確認された。

4. 燃料噴霧の数値解析

本研究では燃料噴霧の挙動に関して理解を深めるため、KIVAコード⁽⁵⁾を使った数値計算を行った。計算条件は図5中に示す。

図5(a)は、図中のモデル噴射率に示すように、噴射期間(1000rpmの回転数を想定すればクランク角度で25度)の最初の1/8の期間に噴射された燃料を黒色、残りの燃料を灰色(さらに斜線)で表示し、始めに噴射された燃料がその後噴霧内のどこに分布するかを調べたものである。これによると、始めに噴射された燃料は噴射直後は噴霧の前面に分布するが(噴射開始からの時間 $t=0.9\text{ms}$)、その後前方の空気の抗力を受けて減速し、さらに後続の噴霧が中心軸上で速い速度分布をもって追い越してくる($t=1.5\text{ms}$)ため、噴霧周辺部へ拡散される($t=2.4\text{ms}$)。

ここでもし最初に噴射された燃料が最初に着火するとすれば、着火遅れが長い場合は、噴霧先端部でなく周辺部から着火するということになる。前述したように、図3中に示したバンカー油噴霧の着火状況の写真でも着火は噴霧の周辺部から起こっており、図5(a)の計算と符合している。

図5(b)は、噴射期間中始めの3/4の期間に噴射された燃料を灰色(さらに斜線)、最後の1/4の燃料を黒色で表示したものである。図5(a)で理解できたように、後続の燃料が噴射されている間は、先に噴射された燃料は噴霧中心部から空気の多い噴霧周辺部へ拡散され得る。しかし図5(b)の $t=4.2\sim 5.4\text{ms}$ の計算結果に示すように、噴射期間終わり頃に噴射された燃料(黒色)は、後続の燃料が来ないため噴霧中心部に停滞し続ける。

バンカー油の拡散燃焼の遅れを挽回するには、このような噴霧中心部の燃料過濃域に空気を導入する必要がある。それには図4の(G)のように小噴口径と高噴射圧力を組み合わせ、噴霧内への空気導入を全般的に改善することのほか、オーバースワールにならない範囲でスワールを与えること、

図5 KIVAコードによる噴霧挙動の計算

例えば船用2ストローク機関のようなサイド噴射方式として、燃料噴射終了後も噴霧火炎を追いかける方向にスワールを与え、噴霧中心部の燃料過濃域の拡散を図ることなどが有望な対策と考えられる。

5. 結 論

本研究では、バンカー油と軽油の燃焼特性の比較を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 実機を使った運転実験から…

バンカー油では軽油に比べて排気微粒子が激増する傾向にあり、それは特にSOFの排出の増加による。

(2) 単一噴霧の光学的観察から…

バンカー油噴霧中には非蒸発部の大きなコアが存在し、ピストン上面への到達時間と着火遅れ時間との兼ね合いによっては、その非蒸発部が未燃のままピストンへ衝突することもある。

(3) 燃焼室の可視化観察から…

バンカー油の燃焼上の問題点は、その低い蒸発性に起因する噴霧内の燃料・空気分布の不均一によるものが多い。小噴口径と高噴射圧力の組み合わせは、バンカー油噴霧の燃焼改善の一案となる。

(4) 燃料噴霧の数値解析から…

バンカー油の拡散燃焼の改善には、噴射期間終

わり頃に噴射された燃料噴霧をうまく拡散させる手段が必要である。

本研究に終始ご指導とご助言を頂いた和栗雄太郎九大名誉教授（福岡大学教授）、ご協力を頂いたハノーバー大学（ドイツ）K. Groth教授、三菱石油（株）開発研究所、前田和幸水産大学校助教授、九大の大坪勝文部技官、卒業生の井手弘、佐川平、御竿剛、菅智教、山本拓志の各氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) K. Takasakiほか2名, ASME-ICE-Vol. 26-1, (1996), 63-70.
- (2) K. Takasakiほか5名, Influences of fuel spray impingement on combustion in a marine diesel engine. In 21st CIMAC, D-13, 1995.
- (3) N. Bonk. Zur Abgasemission eines mittelschnelllaufenden Dieselmotors im Schwerölbetrieb. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 106, 1993. (in German).
- (4) 和栗ほか3名, 機論, 25-156, (1959), 820.
- (5) Amsden, A. A.,ほか2名, KIVA-III: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays, (1989), Report of Los Alamos National Laboratory, No. LA-11560-MS.