低質重油の性状とすす、デポジット及び リング摩耗などとの関連性*

塩出敬二郎**・辻 歌男**

Influence of Qualities of Low Grade Fuels
on Soot, Deposit, Ring Wear and Others

By Keijiro Shiode, Utao Tsuji

A small sized, high speed, direct injection, naturally aspirated Diesel engine and eight kinds of fuel have been used to investigate the influence of fuel qualities on soot, deposit, piston ring wear and deterioration of lube oil. A 30 hours running test of the Diesel engine was carried out for each fuel. Main items measured included soot emission rate, smoke density, deposit on combustion chamber wall and the vicinity, piston ring wear, n-pentane insoluble in lube oil, total base number of lube oil and viscosity of lube oil. The test results indicated that soot emission rate increased with the increase of carbon residue and sulfur content in fuel oil, and that high soot emission rate promoted piston ring wear and deterioration of lube oil, and that high sulfur fuel oil lowered rapidly total base number of lube oil.

1. ま え が き

近年船用燃料は高粘度化、高比重化及び2次分解装置から生産した重油基材の船用重油への調合の高比率化が進んでいる。これに伴って燃料の着火性、燃焼性が悪化しているために、良好な燃焼を行うことが困難となり、排気ガス中の粒状物質(以後すすと呼ぶ)の排出量が多くなってきている。また、燃料中に硫黄、バナジウム、ナトリウムや触媒残さなどのような機関部品の腐食・摩耗を促進させる成分も多くなっている。このために燃焼室壁、燃料噴射弁、排気タービン、掃気口などへのカーボンなどの付着による機関性能の低下、ピストンリングやシリンダライナの異常摩耗、排気弁の吹抜けなどの故障が多数発生している。しかし、船用ディーゼル機関について、燃料性状とすすの排出特性及びすす排出量と機関故障との関連性についての資料はほとんど見当たらない。そこで、船用燃料の性状がすすの排出特性、燃焼室周りへのデポジット付着量、ピストンリング摩耗量、潤滑油の劣化などにどのような影響を与えるかを実験によって調べた。この実験は、7種類の低質重油と1種類のA重油及び2種類のA/Cブレンド油について、小形高速、直接噴射式ディーゼル機関を用いて行った。以下、この実験研究の概要について報告する。

2. 供試燃料油

この研究のために、表1に示すような性状の異なる8種類の燃料油を用意した。このうち試料番号が1~4及び7の燃料は、日本の船舶が外国で補油したものを研究用に入手したものである。試料番号が5と6の燃料は、研究用に国内の製油所で試作したものである。

試料番号が8のA重油は、国内で一般に販売されている船用燃料である。この他に、試料番号8のA重油と試料番号7のC重油を用いて2種類のA/Cブレンド油を調合した。これらはA重油とC重油の容積割合で25:75と50:50で調合したものである。試料番号1から6の燃料については、分子量の分布状態を調べるためにゲル・パーミエーション・クロマトグラフィによる分析を行った。その結果を図1に示す。このグラフの横軸は分子量を、縦軸は検出器の出力を示している。各燃料油のベースストックとカッターストックの調割合が、この図から読取ることができる。試料番号6の燃料はFCCスラリボトムで、平均分子量は他の燃料に比較して小さいが、ワックス分が多く流動点は+30℃と高いけれども、50℃の粘度は28.3 cStと急に粘度が低くなる燃料で、しかも、触媒残さを112 ppmも含んでいる。試料番号3の燃料は残留炭素分を18%も含んだ、粘度も比重も高いかなり低質なものである。

* 原稿受付 昭和60年1月21日

昭和59年秋季学術講演(昭和59年10月24日)

** 正会員 運輸省船舶技術研究所(三鷹市新川6-38-1)

表 1 供試燃料油の性状

試料番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
補油港	ダーバン	ロスアンゼルス	ロッテルダム	サバンナ	高粘度油	FCC油	ロスアンゼルス	(A重油)
補油国	南ア連邦	U. S. A.	オランダ	U. S. A.	日本	日本	U. S. A.	日本
比重 (15/4℃)	0.992	0.962	0.996	0.979	0.965	1.008	0.963	0.8556
動粘度 (50℃) cSt	202	160	357	225	378	28.3	282	3.0
(100°F) RW 1 秒	1650	1300	3300	1850	3500	180	2500	
引火点 ℃	80	104	98	80	108	96	82	87
流動点 ℃	-7.5	-10	-2.5	-10	-10	30	+10	-12.5
残留炭素分 %	16.8	8.16	18.0	14.7	11.5	4.53	7.22	0.25
水分 vol %	0.08	0.10	1.70	0.23	0.05	<0.1	0.05	<0.05
硫黄分 wt %	3.00	1.44	3.08	2.53	3.86	0.98	1.52	0.98
窒素分 wt %	0.29	0.63	0.32	0.27	0.23	0.06	0.58	0.01
灰分 wt %	0.04	0.03	0.08	0.06	0.01	0.04	0.03	<0.01
塩素分 ppm	5	16	27	31	130	<5	5	
V ppm	110	49	97	155	104	1	38	
Na ppm	17	14	39	36	73	2	60	
Si ppm	<10	<10	<10	<10	<10	75	<5	
Al ppm	<5	<5	<5	<5	<5	37	<5	
アスファルテン wt %	11.7	3.80					2.45	
アニリン点 ℃	76	59	65	71	73	57	66	
ディーゼル指数	19	21	16	21	24	12	23.3	
総発熱量 kcal/kg	10160	10350			10230	10020	10650	10700

3. 実験に使用した機器類

この実験に使用したディーゼル機関及び計測機器などの全体的な配置の概要は図2に示すとおりである。

ディーゼル機関は直流電気動力計に接続されていて、始動、モータリング、負荷運転ができるようになっていゝる。ディーゼル機関の潤滑油は電気加熱器及び水冷却器によって潤滑油冷却器出口の温度が、また機関冷却水は電気加熱器及び給水弁(電磁開閉弁)によって機関出口の温度が、決められた値になるように制御されている。

低質燃料は、恒温油槽で60℃に加熱され、ギャポンで約3 kgf/cm²に加圧され、フィルタ及び容積型燃料流量計を通り、電気加熱器で所定の温度まで加熱されて燃料噴射ポンプに供給されている。実験機関の回転数、出力、吸込空気量、燃料流量、排気温度、シリンダ圧力などの主要なデータは、マイクロコンピュータで収集処理されている。次に主要な機器について概要を説明する。

3.1 実験機関 この実験に使用したディーゼル機関は、小形水冷、単気筒、直接噴射、無過給式の四サイクル機関で、その主要目は表2に、また、機関の断面は図3に示すとおりである。

3.2 すず捕集装置 排気ガス中に含まれるすずの量を測定するために図4に示すような装置(JIS Z8808ダスト捕集装置に準拠したもの)を作り使用した。

この装置は、排気ガスの平均流速と同じ速度で排気ガスを吸引し、この排気ガスをフィルタでろ過し、フィルタに捕集されたすずの重量を計るものである。吸引ノズルの位置は、排気弁から約3 m下流側で排気管の中央である。また、吸引管は120℃に加熱して、水滴が管壁に

図 1 供試燃料油の分子量分布

図2 実験装置の概略

表2 実験機関の主要諸元

製 作 者	AVL (オーストリア)
名 称	AVL 502
サイクル	4
燃 焼 室 型 式	直 接
給 気 方 法	自 然 吸 入
冷 却 方 法	強 制 水 冷
シリンダ数	1
シリンダ径	115mm
ストローク	120mm
最高回転数	2800 rpm
排 気 量	1246.4 cc
圧 縮 比	18.0
最高爆発圧力	100 kg/cm ²
燃料噴射ポンプ	ボッシュ式
開 弁 圧	225 kg/cm ²
吸 気 弁 開	20° BTDC
吸 気 弁 閉	46° ABDC
排 気 弁 開	51° BBDC
排 気 弁 閉	15° ATDC

付着し、その上にすすが着くのを防ぐようにしている。すすの捕集には、グラスファイバ製で外径が 90 mm、保留粒子径が 0.6 ミクロンのフィルタを使用した。

3.3 スモーク濃度 スモーク濃度の測定にはボッシュ式スモークメータを使用した。測定位置はすす捕集用の吸引ノズルとはば同じ所である。

3.4 その他の機器 すす重量、ピストンリングの摩耗重量、デポジットの付着重量などの重量測定には、測定精度 0.1 mg の電子式直示天びんを使用した。潤滑油の粘度測定には回転粘度計を、全塩基価の測定にはデジタル pH メータを、潤滑油中の *n*-ペンタン不溶解分の測

図3 実験機関断面

定には、ミリポアフィルタ(保留粒子径 1.2 ミクロンのメンブランフィルタ)を使用した。

4. 実験方法及び測定方法

前述した 10 種類の燃料油のうち試料番号 1 のものを

図4 すす捕集装置

除いた9種類の燃料油について、一定出力で各々30時間の連続運転を行い、スモーク濃度、すす濃度、デポジット付着量、ピストンリング摩耗量、潤滑油の粘度、比重、全塩基価及び潤滑油中の n -ペンタン不溶解分の変化などを調べた。機関の運転条件は、回転数1600 rpm、軸平均有効圧力5.79 kgf/cm²(図示平均有効圧力は約10 kgf/cm²)、冷却水温度(機関出口で)80℃、潤滑油温度(冷却器出口で)60℃、燃料温度(噴射ポンプ入口で)110℃(ただし、A重油の場合は室温、A/Cブレンド油の場合は80℃)であった。スモーク濃度及びすす濃度は実験中ある時間間隔で測定を行った。すす濃度は、排気ガス20NIをフィルタでろ過した時にフィルタに捕集された重量で表わしている。また捕集重量は、すす捕集前後におけるフィルタの重量差とした。フィルタ重量の測定は、すす捕集前に乾燥炉によって200℃で約1時間乾燥してから、また捕集後は水分の影響を除くために100℃で約1時間乾燥してから、電子式直示天びんで行った。燃焼室周りのデポジット付着量は、燃焼室周りを5箇所に分けて各箇所(①シリンダヘッドの触火面で、吸排気弁と燃料噴射弁を除いた部分、②ピストン頂面でキャビティを含む部分、③ピストン側面で第1リングと頂面の間の部分、④吸気弁全体、⑤排気弁全体)に付着したデポジットを鉄製のヘラでかき落とし、その重量を測定した。ピストンリングの摩耗量は、実験前後に重量を測定し、その重量差で表示した。実験に使用した機関のピストンリングは圧縮リング2本、オイルリング1本の3本構成のものである。潤滑油は各実験を始める前に新油と交換し、実験終了後に機関を停止する前にオイルパンより試料油を採取した。そして、粘度、比重、 n -ペンタン不溶解分、全塩基価(JIS K2501 過塩素酸法のB法)を測定し、新油のそれと比較し劣化の程度を評価した。

この実験に使用した潤滑油(新油)の主な性状を表3

表3 潤滑油の主な性状

比	重	15/4℃	0.891
動	粘	cSt/40℃	97.9
	度	cSt/100℃	11.0
引	火	点	232
粘	度	指数	VI
全	塩	基	価
n -	ペン	タン	不溶解分
SAE	粘	度	番号
		mg KOH/gr	4.97
		W%	0.191
			30

に示す。

5. 実験結果

A/Cブレンド油(試料番号7と8の燃料を調合)におけるA重油の影響を調べるために、A重油の調合割合が100、75、25、0パーセントの油についての実験結果をまとめたのが表4である。表中のスモーク濃度及びすす濃度は、実験中に計測した値の平均値である。デポジット付着量、ピストンリング摩耗量、 n -ペンタン不溶解分、潤滑油粘度、全塩基価は30時間運転後のものである。これらの実験結果のうちから、A重油の調合割合とスモーク濃度(ボッシュスモークナンバ)及びすす濃度(排気ガス20NI中に含まれるすすの重量)との関係をグラフで示したのが図5である。図中の実験条件で N は機関回転数を、 P_e は軸平均有効圧力を、 T は実験時間を表わしている。

この実験条件下ではすす濃度が10 mg/20 NIは、燃料消費量の約1パーセントがすすとなって排出されていることを示している。図6はA重油の調合割合と各箇所へのデポジット付着量及び全体の付着量、各ピストンリングの摩耗量及び全体の摩耗量との関係をグラフで示したものである。A重油の割合が増加すれば、スモーク濃度、デポジット付着量、ピストンリング摩耗量は低下する傾

表 4 A 重油, C 重油及び A/C ブレンド油の実験結果

Fuel	Gp	Sm	Gd	Wr	ΔSS	ΔVis	ΔTBN
A 100	7.5	0.8	1.567	0.0648	0.306	3.8	0.45
A 50/C 50	11.6	1.3	1.370	0.1241	0.217	1.5	-0.12
A 25/C 75	10.5	1.8	1.814	0.1631	0.213	1.5	-0.17
C 100	9.1	2.3	2.117	0.2251	0.225	2.7	-0.22

記号説明 A 100 試料番号 8 の A 重油
 A 50/C 50 試料番号 8 の A 重油 50% と試料番号 7 の C 重油 50% のブレンド油
 A 25/C 75 試料番号 8 の A 重油 25% と試料番号 7 の C 重油 75% のブレンド油
 C 100 試料番号 7 の C 重油
 Gp すず濃度 (排気ガス 20 NI 中のすず重量) mg/20 NI
 Sm スモーク濃度 Bosch・スモーク・ナンバー
 Gd デポジット付着量 (5 箇所合計) gr
 ΔSS 潤滑油中の n -ペンタン不溶解分の増加量 W%
 ΔVis 潤滑油粘度の増加 cSt
 ΔTBN 潤滑油全塩基価の増加 (ーは減少) mgKOH/gr
 Wr ピストンリング摩耗量 (3 本の合計) gr

図 5 A/Cブレンド油のスモーク濃度とすず濃度

図 6 A/Cブレンド油のデポジット付着量とピストンリング摩耗量

向を示すが、すず濃度だけは別の傾向を示している。A 重油 100 パーセントの場合、ピストン側面③のデポジット付着量が他の場合に比較して多くなっているが、これはピストンを抜く時にライナ側に付着していたデポジットをピストン側面に付けたものと思われる。

燃焼室周りの各箇所のデポジット付着量は、5 箇所での合計の付着量が多いものは多くなっていて、各箇所の付着割合にはあまり大きな差はない。

ピストンリングの摩耗量についてみると、3 本のリン

グ摩耗量のうちで第 1 リングの摩耗量が他のものに比較してかなり大きい。第 2 リング及びオイルリングの摩耗量は、A 重油 100 パーセントの場合のオイルリングの摩耗量以外は、第 1 リングの摩耗量にほぼ比例している。

各種低質油及び A 重油の実験結果をまとめたのが表 5 である。これらの実験結果の中からスモーク濃度、すず濃度、デポジット付着量、ピストンリング摩耗量を各種低質油及び A 重油についてグラフで示したのが図 7 と 8 である。試料番号 1 の燃料は、30 時間運転に必要な量

表5 低重質油の実験結果

Fuel No.	Gp	Sm	Gd	Wr	ΔSS	ΔVis	ΔTBN
1							
2	10.5	2.0	2.428	0.1872	0.368	3.8	-0.06
3	16.1	3.2	2.284	0.6235	2.378	6.3	-0.44
4	13.2	2.6	2.299	0.4154	0.917	4.9	-0.31
5	12.9	2.6	2.734	0.3347	1.317	4.3	-0.64
6	21.0	2.3	3.726	0.4345	3.109	3.8	-0.10
7	9.1	2.3	2.117	0.2251	0.225	2.7	-0.22
8	7.5	0.8	1.567	0.0648	0.306	3.8	+0.45

記号説明 表4参照

図7 低重質油のスモーク濃度とすす濃度

だけ入手することができなかったので、摩耗実験はできなかった。低重質油では、燃料の性状によってスモーク濃度、すす濃度、ピストンリング摩耗量にかなりの差がでている。すす濃度では、最高のものは最低のものに比べて2倍以上にもなっている。ピストンリング摩耗量では、3倍もの差がでている。

表1の燃料性状と表4に示す実験結果との関連性を調べるために、これらの間の相関係数(ピアソンの積率相関係数)を計算した。しかし、この計算では試料番号6のFCC油は他の油に比較して性状が大きく異なっていると、実験が途中で中断したために実験結果の信頼性が低いと思われるので除外している。燃料性状としては残留炭素分(CCR)、硫黄分(S)、灰分(Ash)の濃度、ディーゼル指数(DI)、動粘度(Vis)、水分濃度(W)に注目し、機関側の実験結果としては、すす濃度(Gp)、スモーク濃度(Sm)、デポジット付着量(Gd)、ピストンリング摩耗量(Wr)、潤滑油中のn-ペンタン不溶解分の増加率(ΔSS)、潤滑油粘度増加率(ΔVis)及び潤滑油の全塩基価の増加率(ΔTBN)について調べた。

その結果を表6に示す。この表から分るように、燃料中の残留炭素分はすす濃度、スモーク濃度、ピストンリ

図8 低重質油のデポジット付着量とピストンリング摩耗量

ング摩耗量、潤滑油中のn-ペンタン不溶解分、全塩基価とは強い相関のあることが示されている。これは燃料中の残留炭素分が増加すれば、燃焼が困難になりスモーク濃度、すす濃度が高くなり、また、すす濃度が高くなればピストンリングの摩耗を促進し、潤滑油中のn-ペンタン不溶解分を増加させるものと思われる。残留炭素分と全塩基価の間にも強い相関が示されているが、これは今度の実験に使用した燃料では残留炭素分の多いものは硫黄分も多く含んでいたためと思われる。図9は燃料中の残留炭素分の濃度とすす濃度及びピストンリング摩耗量との関係を示したものである。燃料中の硫黄分と相関の強いものはすす濃度と全塩基価である。

すす濃度については、前にも述べたように今度の実験に使用した燃料では硫黄分と残留炭素分との間には割合

表 6 燃料性状と実験結果との相関係数

	Gp	Sm	Gd	Wr	ΔSS	ΔVis	ΔTBN
CCR	0.969	0.954	0.655	0.963	0.818	0.765	-0.823
S	0.819	0.765	0.762	0.736	0.776	0.597	-0.894
Ash	0.756	0.701	0.140	0.848	0.665	0.749	-0.368
DI	-0.762	-0.927	-0.771	-0.750	-0.525	-0.407	0.815
Vis	0.751	0.917	0.783	0.752	0.666	0.373	-0.968
W	0.754	0.603	0.0752	0.827	0.872	0.843	-0.325

記号説明 CCR コンラドソン残留炭素分
 S 硫黄分
 Ash 灰分
 DI ディーゼル指数
 Vis 燃料粘度
 W 水分

図 9 残留炭素分とすず濃度及びピストンリング摩耗量との関係

強い相関があったために、あたかも硫黄分とすず濃度が直接相関が強いようにみえるものと思われる(表 7 参照)。全塩基価については一般的に云われているように、硫黄分の燃焼生成物が潤滑油の全塩基価を低下させるためである。図 10 には燃料中の硫黄分の濃度と潤滑油の全塩基価の変化率の関係を示したものである。

この図中に試料番号 8 (A 重油) の○印が入っていないが、これは全塩基価の変化量が +0.45 mgKOH/gr であ

図 10 硫黄分と全塩基価との関係

ったためと、全塩基価が増加した理由づけが出来なかったこと、この潤滑油の他の分析値 (ΔSS , ΔVis) についても不自然なところがあり、サンプリングに問題があったと思われたので外したためである。

燃料中の灰分はピストンリング摩耗量との間に強い相関を示していて、これは灰分の性質から摩耗を促進することは十分に予想できる。燃料のディーゼル指数とスモーク濃度及び全塩基価の間にはかなり強い相関があるが、これはディーゼル指数が燃料の着火性を示す尺度であることから理解できる。燃料粘度はスモーク濃度及び全塩基価との間に強い相関があるようにみえるが、これは粘度の高い燃料は残留炭素分や硫黄分を多く含みディーゼル指数の低い傾向を持っていて(表 7 参照)、このために前述のような相関関係が現れたのであろう。また、燃料中の水分はピストンリング摩耗量、 n -ペンタン不溶解分、潤滑油粘度変化とかなり強い相関があるようにみえるが、これもこの実験に使用した燃料の傾向による所が大きいに思われる。すなわち、今度の実験に使用した燃料で水分の多い燃料は灰分を多く含んでいるためである(表 7 参照)。表 7 は今度の実験に使用した燃料の性状間の関連性を相関係数で表わしたものである。この表からわかるように残留炭素分の多い燃料は灰分が多く粘度が高くディーゼル指数が低い傾向を示している。また、硫黄分の多い燃料は粘度が高く、灰分の多いもの

は水分も多い傾向を示している。

これは今度の使用燃料についての傾向であるが、試料の数が少ないので、この傾向が一般の燃料に適用できるかどうかかわからない。表8は各実験結果間の関連性を相関係数で表わしたものである。これで見るとすす濃度はスモーク濃度、ピストンリング摩耗量、*n*-ペンタン不

表7 燃料性状間の相関係数

	<i>S</i>	<i>Ash</i>	<i>DI</i>	<i>Vis</i>	<i>W</i>
<i>CCR</i>	0.759	0.808	-0.865	0.785	0.682
<i>S</i>		0.281	-0.552	0.840	0.385
<i>Ash</i>			-0.661	0.390	0.816
<i>DI</i>				-0.799	-0.465
<i>Vis</i>					0.430

記号説明 表6 参照

表8 実験結果間の相関係数

	<i>Sm</i>	<i>Gd</i>	<i>Wr</i>	ΔSS	ΔVis	ΔTBN
<i>Gp</i>	0.896	0.626	0.967	0.920	0.871	-0.784
<i>Sm</i>		0.733	0.908	0.744	0.581	-0.915
<i>Gd</i>			0.484	0.805	0.238	-0.882
<i>Wr</i>				0.914	0.846	-0.739
ΔSS					0.912	-0.632
ΔVis						-0.397

記号説明 表4 参照

図11 スモーク濃度とすす濃度及びデポジット付着量との関係

溶解分、潤滑油粘度に関連が深いことがわかる。図11はスモーク濃度とすす濃度及びデポジット付着量との関係を示したもので、スモーク濃度が高くなれば、デポジットの付着量、すす濃度も高くなっている。

デポジット付着量は一般的にはすす濃度やスモーク濃度が高くなれば多くなると思われるが、実験結果としてはこの傾向が明確に出ていない。これはデポジットがある程度付着しては剥離し、また付着しては剥離するという過程をたどるためと思われる。

図12はすす濃度と*n*-ペンタン不溶解分との関係を示したものである。また図13はすす濃度とピストンリング摩耗量との関係を示したもので、すす濃度が高くなればピストンリング摩耗量が大幅に増加するのがわかる。スモーク濃度はピストンリング摩耗量、全塩基価と深い関連があり、デポジット付着量は*n*-ペンタン不溶解分と全塩基価に関連が深い。ピストンリング摩耗量は*n*-ペンタン不溶解分や潤滑油粘度と関連が深い、また*n*-

図12 すす濃度と*n*-ペンタン不溶解分との関係

図13 すす濃度とピストンリング摩耗量との関係

ペンタン不溶解分は潤滑油粘度と深い関連がある。

6. ま と め

これまで述べた実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) A/C ブレンド油では, A 重油の調合割合が多くなるとスモーク濃度, デポジット付着量, ピストンリング摩耗量などは減少する.
- 2) 低質重油では, すす濃度は燃料中の残留炭素分や硫黄分などが多くなると高くなる.
- 3) スモーク濃度は残留炭素分の増加, ディーゼル指数の低下, 粘度の増加などにより高くなる.
- 4) ピストンリング摩耗量は, 残留炭素分, 灰分, 水分などが多くなると増加する.
- 5) 潤滑油中の n -ペンタン不溶解分は, 残留炭素分, 水分などが多くなると増加する.
- 6) 潤滑

油粘度は, 水分, 残留炭素分, 灰分などが多くなると高くなる. 7) 潤滑油の全塩基価は燃料粘度の上昇, 硫黄分の増加などで減少が促進される.

7. あとがき

今回の実験に使用した燃料の数が少なかったために, 実験結果が現在市場に出回っている燃料の性状を必ずしも代表するものになっていないかもしれない. 今後も各種低質重油についての実験を行い燃料性状と機関故障に関連する信頼性の高い資料を集めることが必要である. 最後に, 本研究の一部は日本機械学会 RC-61 研究分科会の援助によって行われたことを記して謝意を表します.