ディーゼル燃焼に影響を及ぼす 重油の性状 (Ⅱ)

—イ オ ウ 分—

——昭和35年11月21日受理——

東京商船大学 内 海 博

要旨：—今までの実験によつてディーゼル用重油の燃焼性を阻害する要素は必ずしも残留炭素分だけではないことが判明した。そこで燃焼反応を阻害し、また燃焼生成直後の単一カーボン粒子の集合生長を烈しくするであろうと思われるイオウ分について前回と同じような実験を行つて検討してみた。その結果予期したようにイオウ分の多いものは燃焼室内付着の炭素性物質、特に燃料噴射弁噴口付近の付着物の量が多く、ほぼ比例関係にあることがわかつた。したがつて残留炭素分にイオウ分がプラスされたもの（作用の上で）が炭素性物質形成に比例的関係にあることが判明した。従来イオウ分はとかくエンジンの腐蝕摩耗の面についてののみ重要視されがちであつたが、燃焼性能の面についても考慮すべきであることがわかつた。

Ⅰ. 緒 言

ディーゼル機関を運転する際に重油の燃焼性能がその性状の如何なる要素によつて左右されるかという問題について、多くの実験を行つて検討をつづけてきたがはつきりした因子をつかむことがなかなか困難である。多くの文献によると、燃料油中のイオウ分は燃焼を左右する直接の因子ではないとされているが、各種重油のディーゼル燃焼について現在まで実験した結果を検討してみるとつぎのことがわかつた。

- (1) 不完全燃焼の多発するのは、ほとんど高イオウ分重油使用の場合である。
- (2) 燃焼室内付着デポジット量が、大体重油イオウ分に比例して増加する。

しかも外国ではディーゼル重油の規格として、残留炭素分とイオウ分との和の値をとりあげているところもあるので、イオウ分について検討してみる必要があると考えた。

従来重油中のイオウ分は實際上燃焼に対する影響は僅少でその害は重大でないといわれてきた。そして芳香族化合物の形で存在するイオウは腐蝕性はない故、全イオウは燃料の品位判定の標準とはならないといわれてきた。このことは過去における直留の製品およびイオウ分のきわめて少い製品についてはいわれるのであるが、現在におけるようにイオウ分の多いしかも分解残渣重油を使用する場合にはイオウ分について

は当然考慮しなければならない。ディーゼル燃料のイオウ分に対する問題点としては、燃焼によつて生じた亜硫酸ガスが水蒸気と結合して硫酸を凝縮し弁座、弁類、シリンダ、ピストンなどを腐蝕摩耗せしめることと、イオウ分による燃焼障害である。ここでは後者について実験的に考察を加えることとした。

Ⅱ. 実験方法

特定イオウ分を有する試油を調整し、実験用ディーゼル機関にて定負荷のもとに定時間連続運転を行つて燃焼の良否を比較検討し、イオウ分が重油の燃焼性能評価の指数としてどの程度正確であるかを確かめ、イオウ分の異なる混合重油の燃焼性能の評価を行つた。

試料燃料油としてはイオウ分が1.5%、2.5%、3.5%以上のものと三段階にわけ、さらに残留炭素分とイオウ分との和の値が11.0%、15.5%、18.0%以上になるような重油を調整した。基油はPS300、PS400、ワフラ・フラックス、ワフラ・ガス・オイルを用いた。これらの性状を第1表および第2表に示す。

実験用エンジンとしては第1報における実験と同じようにシリンダ径220mm、行程350mm、毎分回転数380、出力25B.H.P.の単筒4サイクルディーゼルエンジンを使用した。エンジン・テストの要領もほぼ第1報に報告したものと同一で、380rpmにおいて18.75B.H.P.（4分の3の出力）で10時間連続運転を行うこととし、主なる運転条件は第3表に示すとおりである。

第1表 試料性状 (その1)

試料番号 実験番号	301	302	303	304	305	306	307	
性状その他	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900 3000	混合用 基油
混合率 (重量) %								
P S 300	100	50	—	53	30	—	—	—
P S 400	—	50	100	—	30	—	—	—
ワフラ・フラックス	—	—	—	30	35	65	87	100
ワフラ・ガス油	—	—	—	17	5	35	13	—
イ オ ウ 分 (A) %	1.36	1.41	1.46	2.32	2.50	3.43	4.12	4.52
残留炭素分 (B) %	10.4	13.5	17.4	8.8	11.7	8.1	10.8	11.7
A + B %	11.8	14.9	18.9	11.1	14.2	11.5	14.9	16.2
汙過時間 Sec	800	660	650	1,130	1,090	1,200	1,180	—
比重 15/4°C	0.9711	0.9920	1.0097	0.9531	0.9801	0.9312	0.9611	0.9803
ヘプタン不溶分 %	7.35	10.47	12.42	5.68	8.99	3.99	4.95	10.70
灰 分 %	0.04	0.06	0.07	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02
発熱量 kcal/kg	10,210	10,160	10,120	10,320	10,200	10,420	10,320	10,200
水分 %	trace	trace	1.0	trace	trace	trace	trace	trace
流動点 °C	+12.5	+3.5	+11.0	+4.5	+1.5	-10.5	+3.0	+13.0
引火点 °C	92	108	105	110	108	113	130	176
粘度 (R.W.①@50°C) Sec	292	702	1,724	259	872	201	1,050	3,761
粘度 100 Sec における温度 °C	78	90	110	76	96	70	107	—

第2表 試料性状 (その2)

用途	混合用	起動用
産 地	ワフラ	—
比 重 15/4°C	0.8523	0.8243
粘度 (R.W.①@50°C) Sec	33.0	—
粘度 (S.S.U.@100°F) Sec	—	37.0
イ オ ウ 分 %	1.405	0.232
アニリン点 °C	67.2	—
セタン価	—	54.8
発熱量 kcal/kg	—	10,800
灰 分 %	trace	trace
A.S.T.M. 留出温度 °C		
I. B. P	227	170
5%	254	207
10%	261	214
30%	274	234
50%	287	256
70%	303	270
90%	327	291
95%	339	313
E. P.	355	340

燃料噴射時における重油粘度を一定に保つようにした。このために燃料噴射弁入口における重油粘度を R.W. で 100 Sec になるように重油温度を調整した。

しかしながら燃料ポンプ前の油温が 90°C 以上になるものもあり、これらの重油においては水分、軽質油分によるポンプ吸入側のベイパーロックが起るので燃料ポンプ入口油温は最高 90°C におさえポンプ出口パイプより燃料弁までの高圧油管にアスベストヤーンとニクロム線をまいて電熱によって加熱するようにして燃料弁入口にて 100 Sec になるようにした。

第3表 運転条件

項 目	調 整 値
燃料ポンプつき始め	上死点前 30.4°
燃料噴射弁調整圧力	280kg/cm ²
燃料噴射弁	0.3mm×4×114°
気筒冷却水出口の温度	45°C
潤滑油	350ディーゼルエンジン油 (酸素0.10)

本燃焼試験において重油中の懸濁粒子の問題については除外して考えるので、ろ過条件はつぎのようにした。すなわち燃料計測管に 100mesh 金網を、ストレーナには 200mesh 金網を使用した。また始動に当っては軽油にて始動を行い始動困難による影響を除外するようにこころがけた。

Ⅲ. 実験の結果

燃焼性能の基準として第1報における場合と同様に

まず燃料消費率を取りあげてみた。そして排気温度との関係をその他の燃焼性能曲線と共に第1図ないし第3図に示した。

第1図 燃焼性能曲線 (実験 No. 2300, 2400, 2500)

第2図 燃焼性能曲線 (実験 No. 2600, 2700)

第3図 燃焼性能曲線 (実験 No. 2800, 3000)

排気色濃度も前述の燃料消費率と同様、重油の燃焼性能を評価する一つの指針になるが燃焼の変化と共に刻々と変化するものであるので自記せしめる必要がある。結果を第4図に示した。

第4図 排気濃度変化曲線

つぎに燃焼室に付着する、いわゆるカーボンまたはデポジットと称している炭素性物質の生成が問題である。本実験におけるイオウ分とこの炭素性との関係を燃焼室内の各部分に分けて計測したものを第5図に示した。

第5図 燃 焼 室 内 付 着 物 量

IV. 結 果 の 考 察

エンジンテストによるディーゼル燃焼の良否を判定するに際して、多くの評価法をこころみたがどうも燃焼状況の明確、簡潔な表現ができないので苦慮してきた。今回の実験終了におよんで重油独特の燃焼に対する解釈と評価法を試みた。それを以下に示す。

(1) 異常燃焼について

試料の燃焼状況の推移について二つの形があると考えられる。すなわち No. 2400 のようなものと No. 3000 のようなものである。No. 2400 のデーターをみると 10 時間を通じ大体同一であり、あまり大きなふれがなかったといえる。一方、No. 3000 においては、ふれていなかったところと、大分大きくふれていたところ、すなわち燃焼の悪化していたところがある。

このふれについて考えてみることにする。これについては C. Casci⁹⁾ らが A 重油とボイラー重油とで過給器付 6 気筒の 428rpm で 900HP のディーゼルエンジンを一定負荷で 48 時間運転して 4 時間おきにとつたデーターを調べると、両者ともに燃料消費率のふれは 5gr/BHP/hr 以下、排気温度のふれは、20°C 以内におさまっている。本実験において軽油を使用して一定負荷、一定回転数にて 10 時間運転を行い、1 時間おき燃費を測定してそのふれをみると、大体 5gr/BHP/hr 位である。No. 2400 のふれも上述の範囲内におさ

まつていて、この程度のふれは実験誤差範囲内、または通常のちよつとしたエンジンの機械的調子によつて起りうる範囲のものであると考えられる。No. 2500, No. 3000 でノッチ位置がフラットのときの各データーのふれをみると、これも上述の範囲内に入っている。一方 No. 3000 を例にとつてみると、この場合 2 回ノッチ位置が 7 以上も上昇し、排気色が無色から黒色にかわり燃費は 30~40gr/BHP/hr 以上増加している。これは前述の普通のふれの範囲をとびこしているわけである。つぎにさらに詳細に調べてみると、燃焼の悪化する際には全測定データーが悪くなつて行くが、このうち刻々変化をとらえているのは連続に測定している燃料ハンドルノッチ位置（噴射量の変化を表わす）と排気温度、排気色とである。これらの変化をみるに、ふれが起り始めてから最大に至るまではゆるやかであるが最大点からふれない状態にまで復帰する際には非常に迅速である。このことは全データーについていえる。これを説明するには燃焼室内に燃焼を阻害する邪魔物（大きなカーボン）が出現し、これがだんだん生じ、ある点まで行くとき急にそれが消失してしまうと考えればよい。すなわち一定条件でエンジンを運転すると、堆積物は一定の速度で一定の厚みに到達するまで生成されていくが、ある厚みになると堆積物を通じて金属壁に流れる伝熱の程度に熱平衡を許す条件が存在し、この熱平衡の点までは堆積が継続されるが、それ以上では別離が生ずるようになる。また非常に大きくなったときはそのものの自重、または空気抵抗などによつて剥脱する。このように考えると、エンジンの停止の際にふれの大きかつた場合には、オーバーホールの際に邪魔物（大きなカーボン）が残っている。これは燃料噴射弁噴口先端の大きな炭素のラップ状の花（通称）である。運転中、ふれはあつたが停止時にふれていなかったものはオーバーホール後、花がついていたことも、噴口がつまっていたこともなかった。故にさきの邪魔物はズルについた花か、あるいは噴口の閉塞であると考えられる。以上のようにこの実験における大きなふれは噴口先端の花の付着生成、燃料の不完全燃焼生成物による噴口の閉塞という、おそらく重油使用の場合にのみ起る特殊な原因によつて起る不完全燃焼である。これは重油の場合はその分子構造も複雑であり、またガソリンや軽油のように均一性状でないものが多く、いわゆるスラッジと称する懸濁物または沈澱物などの異物を含有するものが多い。これらを含んだものを燃焼させるために噴孔周辺に炭素物質が付着して噴霧を阻害し、燃料消費を増加せしめる。そこで一般の

不完全燃焼と異なるものであるのを、これを異常燃焼と呼ぶことにする。これに反して、ふれのない燃焼部分を定常燃焼と呼ぶことにする。

(2) 異常燃焼の評価

燃料の燃焼性の良否を評価する際に、もつとも重視されるのは燃料消費量あるいは燃料消費率の大小である。それゆえに異常燃焼の強度を評価するにも、異常燃焼時の定常燃焼時よりの燃費の増加量を測れば一番明確になる。しかしそのためには10時間連続運転中、5分おき位にしかも小差も明白になるように確実に燃費を計測しなければならない。このことは加温による重油比重の変化などを考慮に入れると相当困難である。今回の実験においては普通に行われている測定を行つた。すなわち燃料ハンドル位置、排気色、排気温度を10時間連続で記録し、燃費(1,000ccの試料の消費時間)、指圧図、などは起動後30分後から始めて1時間毎に測定したので異常燃焼の発生時期と測定時刻とが一致していない場合があり、全テスト中異常燃焼時の燃費の測定してあるものとないものがある。故に燃費を推定する方法が必要であるが、これには燃料ハンドル位置が大体の噴射量の増減を示すし、また連続測定しているから都合がよい。しかしノッチ位置の増加だけで異常燃焼の有無、強度を決定するわけにはいかない。排気温度の増加、排気濃度の悪化などが伴つて、はじめて確認できると考えられる。そこでつぎのようにして異常燃焼を評価した。

No. 2800 について例をとるとまず定常燃焼部分中、一番データーの良好な測定点3つを選び、その平均値をとる(起動後1回目のデーターは成績良好であつてもエンジンの不定常の部分が含まれると思われるのでとらない)。この場合は3, 6, 8 回目の測定値であつて、その平均値は燃料ハンドルノッチ位置42, 排気温度 340°C, 排気色無色, 燃費 221gr/BHP/hr である。ついで異常燃焼部分について各データーを上定の定常燃焼平均値と比較してその差と異常燃焼の持続時間とを記録する。

No. 2800 の場合、第3図に示してあるA……Eの異常燃焼の記録はつぎのとおりである。

異常燃焼部分	A	B	C	D	E
起動後経過時間 (hr)	1.7	2.1	4.4	6.2	9.3
持 続 時 間 min	25	25	20	25	15
ノッチ位置増加	1~4	3~11	1~6	5	5
排 気 色	無色	黒色	黒色	褐色	黒褐色
排気温度上昇 °C	-	-	60	-	-
燃費率増加gr/BHP/hr	-	-	15	-	-

各テストについてこのような表を作り、そのうち No. 2800 の C のように全記録のとれるものだけ集めて分類すると第4表のようになった。

表の異常燃焼強度Ⅳの項は燃費のふれのはばが大分広くとつてあるが、これはⅣの項になると燃焼の悪化が非常に急激なことが多く、そのため燃費測定に要する時間(15分)中に大きく燃料ハンドルがふれ、した

第 4 表

異常燃焼の評価	定常燃焼状態平均値に対する異常燃焼部分の値				備 考
	燃焼ハンドルのノッチ位置増加	排気温度上昇 °C	排気色	燃料消費率増加 gr/BHP/hr	
I	<3	<10	無色(無煙)	<10	1. I は定常燃焼を含む
II	<3	10~30	白または薄褐色	10~20	2. II ~ V は異常燃焼状態を指す
III	3~6	20~60	褐色または黒色	20~40	
IV	<6	40~100	黒色	40~100	
V	燃焼状態はⅣよりさらに悪化し、もはや、定負荷にての運転は不可能となり、時には自然に停止する。				

がつて燃料ハンドル位置の増加 10~15 のときの燃費増加はいくら、というようにこれ以上細分類することが現在までのデータ数からでは無理なので、このような区分をしたのである。

つぎに、この表と比較して No. 2800 の A, B, D, E のようなデーターの不完全な測定点の燃費増加の推定を行うと、A, D, E は強度Ⅲに属し、B は強度Ⅳに属する。よつて強度Ⅲの状況は A, C, D, E 4 者合計で85分、強度Ⅳの状況はBが 25 分間、それぞれ起つたことになる。これをⅢ×85, Ⅳ×25 というように略記することとする。このような記録を各テスト毎にとると、各テストにおいての異常燃焼の有無、またその程度の大きさが簡単に表示されうるのである。しかし異常燃焼について、各テスト間を相互比較するには、もつと簡単な表示法をとる方がよいので第4表で、異常燃焼強度がⅢおよびⅣの場合には、その燃費増加がⅡのときの大体2倍および4倍であることから、Ⅳ×5の異常燃焼は、Ⅱ×20の異常燃焼に相当すると考え異常燃焼をすべてⅡの強度のものが何分間起つたかというように換算し、その時間を異常燃焼時間と名づけた。No. 2800 の場合には、Ⅲ×85+Ⅳ×25=Ⅱ×170+Ⅱ×100=Ⅱ×270, すなわち異常燃焼時間 270 分である。またⅡの場合の燃費増加は 10~20 であり、定常燃焼時の燃費は 221gr/BHP/hr 位であるから、結局 5~10% 程度の燃費増加をもたらすような異常燃焼が何分起つたかということを異常燃焼時間は

示すわけである。

(3) 異常燃焼と重油の性状との関係

重油のいかなる性状と異常燃焼とが相互関係をもつかを検討するため異常燃焼状況、異常燃焼時間などを第5表に表化した。表からわかるように各実験の異常

燃焼時間は、No. 2800 $\Rightarrow$ No. 300>No. 2700 $\Rightarrow$ No. 2600 $\Rightarrow$ No. 2300>No. 2400 $\Rightarrow$ No. 2500 となつて、No. 2300 を除き、イオウ分が増加するにつれて異常燃焼が増加している。その他の性状についても異常燃焼との関係を調べてみたが一定の関係を有すると考え

第 5 表

実験番号	混合率 (重量) %	イオウ分 (重量) %	残留炭素分 (重量) %	異常燃焼強度	異常燃焼時間 分	燃焼室付着 カーボン量 gr	噴口先端付着 カーボン量 gr
2300	P3 100	1.36	10.4	Ⅱ $\times$ 10 Ⅲ $\times$ 5 Ⅳ $\times$ 25	120	10.16	0.99
2400	P3 50 P4 50	1.41	13.5	Ⅱ $\times$ 5	5	7.72	0.73
2500	P4 100	1.46	17.4	Ⅱ $\times$ 15	15	8.36	2.28
2600	P3 53 W.T.C. 30 W.G.O. 17	2.32	8.8	Ⅱ $\times$ 20 Ⅳ $\times$ 30	140	9.14	1.52
2700	P3 30 P4 30 W.T.C. 35 W.G.O. 5	2.50	11.7	Ⅱ $\times$ 5 Ⅲ $\times$ 26 Ⅳ $\times$ 15	117	14.42	1.35
2800	W.T.C. 65 W.G.O. 35	3.43	8.1	Ⅲ $\times$ 85 Ⅳ $\times$ 25	270	10.85	2.37
3000	W.T.C. 87 W.G.O. 13	4.12	10.8	Ⅲ $\times$ 15 Ⅳ $\times$ 50	230	12.41	1.00

註 K.C.R.: クワイト熱分解残渣油

K.G.O.: クワイトガス油

K.T.C.: クワイト直留残渣油

S.C.R.: セリア熱分解残渣油

S.L.O.: セリア・ライト・オイル

K.G.K.: クワイト・グリーン・ケロシン

K.As.: クワイト・アスファルト

P3: P S 300

P4: P S 400

W.T.C.: ワクラ直留残渣油

W.G.O.: ワクラ・ガス油

るような性状はみ出せなかつた。

つぎに異常燃焼の原因と考えられる燃焼室内付着物と重油の性状についても同様に調べてみたが、噴口の先端にできた花が運転中にとれて開放時についてないものが多いので付着物の生成量は7つの試料から確実につかむことはできない。そこで、この実験の前に行われた多くの燃焼実験のデータと共にイオウ分と付着物の量の関係を調べて図示したのが第6図および第7図である。

第6図 イオウ分と燃焼室内付着物量との関係

第7図 イオウ分と燃料噴射弁噴口先端付着物量との関係

図示のごとく燃焼室付着物全量、ノズル付着物の両者とイオウ分との間に大体比例関係が成立しただけで、他の性状には相互関係のみとめられるものはなかつた。

しかし、付着物は明かにイオウ単体あるいは金属のイオウ塩、などだけでできているのではなくカーボンコークス類似の炭素質が主体であるので、重油中の重質炭化水素から燃焼室内にカーボン付着が生成する際

に重油中のイオウ分が反応促進の触媒作用もしくはカーボンの質を変えるなどの、なんらかの作用をおよぼして、イオウ分の増加につれて燃焼室内付着物が多くなり、それによつて噴口先端の花の付着、噴口の閉塞が起り異常燃焼が頻発するようになると思われる。

またイオウ分によつて付着物の多くなる原因についてはつぎのようなことが考えられる。

- (a) イオウ分が燃焼反応を阻害する。
- (b) イオウ分が多いと燃焼生成直後の単一カーボン粒子の集合生成が烈しくなる。
- (c) 燃焼室壁にカーボン塊が付着する際の接着力がイオウ分が多い方が強い。
- (d) 燃焼室壁に付着生成するカーボン相互の結合がイオウ分によつて強まり、カーボンが硬くてはがれ難くなる。
- (e) ピストンヘッドから反射してシリンダーカバール壁に付着する未燃重油粒のゴム化アスファルト化がイオウ分によつて促進され結局付着

第8図 残留炭素分+イオウ分と燃焼室内付着物量との関係

物が増加する。

- (f) イオウ分の存在は硬質アスファルトの存在を指示する。

以上のような多くの理由が考えられるわけである。

また残留炭素分とイオウ分の和の値について第1報の実験と今回の実験結果からまとめてみると第8図に示すようになり、イオウ分の存在は硬質アスファルトとの存在できることや、カーボンの結合力を増すことなどの理由の裏付けと考えることができる。

V. 結 論

重油のディーゼル燃焼時に起る燃料噴射弁噴口の花の発生および噴口の閉塞による異常に大きい不完全燃焼を異常燃焼と名づけ、その強度、持続時間から重油の燃焼性を判断した結果、今回の試料では No. 2300-をのぞき、イオウ分が増加するにつれて異常燃焼が増加する。しかして重油のイオウ分または残留炭素分とイオウ分との和の値が燃焼室付着物全量、ノズル付着物量とにほぼ比例関係があることが判明した。

文 献

- 1) P. Jackson, "Operating experiences of Doxford engines on high viscosity fuel oils." Group II/2 p. 495, Congres international des moteurs a Combustion interne.
- 2) 石橋弘毅：ディーゼル燃料
- 3) C. Casci IF. Scirocco, "Essais sur Lemploi des huiles Lourdes dans un moteur diesel-tosi a 4 temps surali mente par turbo-compression" Group II/ p. 242, Ibid.
- 4) Toseph A. Moller Harry L. Moir, S.A.E.J., 46, 6. 250~261 (1940).

Effects of Heavy Fuel Oil Characteristics on the Combustion in a Diesel Engine (II)

—On Sulphur Content—

by Hiroshi Utsumi

(Tokyo University of Mercantile Marine)

SYNOPSIS:—It is cleared by the last experiments that the cause of degrading combustion quality is not merely the Conradson carbon residue. So the author studied, with same method, the sulphur content which is considered to check the combustion reaction and promote the conglutination of the carbonicous materials. The result is, as expected, heavy oil of high sulphur content produces almost relatively more carbonicous materials on combustion chamber—especially around the nozzle of fuel valve. Therefore carbon residue added with sulphur is relative to the carbonicous materials. Sulphur content is hitherto regarded only the cause of corrosion wear, but it has great effects on combustion quality.