舶用低質燃料油単一液滴の燃焼*

玉木 恕 乎**・ 久保田俊雄***
堀 井 泰 聡****Combustion of Single Droplet
of Marine Residual Fuel Oils

by Hiroya Tamaki, Toshio Kubota, Yasufusa Horii

An experimental study on combustion characteristics of a single oil droplet hanged on a quartz filament was performed to investigate the effect of fuel oil composition on combustion. Fuel oils used in the experiment were twenty-seven residual oils which had been supplied at the port all over the world for marine use and two residual oils which had been directly supplied from the Japanese oil refineries.

The result shows that the combustion characteristics of single droplet oils under the atmospheric condition have good relationship with the molecular weight distribution of oils. Splashing of a oil droplet during burning was observed in the last stage and also in the early stage of burning period. The mechanism of the splashing in each stage is discussed.

1. ま え が き

第一次と第二次の石油危機以降、需要の変化に伴って石油精製法が軽質分取得を多くする方向へと転換した結果、石油精製の残さを使用している舶用燃料油は低質化へ向かっている。舶用燃料油の低質化は、以前は粘度の増大と硫黄分の増加程度であったが、現在ではその内容が多様化、多面化している¹⁾。このような低質重油を舶用燃料として機関を運転している乗組員にしてみれば、低質化へのすう勢は止むをえないとしても、燃料が機関の燃焼室内で燃焼過程中に良好に燃焼を完了して燃料が有しているエネルギーを十分に解放するとともに、燃焼後の残さ等で機関に障害を起さないこと、が要求であろう。燃料油の燃焼特性の良否を使用前に、また、容易に判別できれば望ましく、この方面への技術開発が緊要課題となっている。

液滴の燃焼については、単一組成の燃料は燃焼過程中に液滴直径の二乗が燃焼時間に対し直線的に減少することが理論的に、また実験的にも確かめられている。しかしながら、多くの炭化水素の混合物である重油の液滴燃

焼は、以前からも研究はなされていたが²⁾³⁾⁴⁾、燃焼の実態が複雑な様相を示しており、その機構が充分に明らかにされたとは言い難い。燃料低質化によると想定される舶用機関の障害発生も数多く報告されている。

本報告は、低質重油の燃焼特性を明らかにする目的で、舶用燃料油として世界各地の港で供給された27種類の低質油と石油精製の残さ油2種類、計29種類の重油を大気圧下で単一液滴として燃焼させ、その観察結果から燃焼特性と成分を表わす1指標である分子量分布との関連を求めたものである。さらに、低質燃料油の燃焼で特長ともなっている液粒飛散の現象について考察を加えた。

2. 実験装置と方法

図1に実験装置全体の概略を示す。本体は透明なアクリル板で作られ、中央にアクリル管を通して試験部を置いてある。管の下部には空気を整流するための網が張ってある。試験部は、石英糸で直径0.3 mmの“く”の字形をしており、先端が0.51 mmの球状をなし、ここに供試燃料約1 mlを液滴状に懸垂する。この石英糸は、周囲の空気の乱れによって燃焼状態が影響されるのを防ぐ意味で、アクリル管内に設置し、本体外から上下と前後の位置調整ができるようになっている。

燃料液滴への点火は、石英糸先端の下方約2 mmの位置に直径0.7 mmのニクロム線で作った点火コイルを置き、コイルへの通電によって生じる熱によって行う。点火の際、液滴の下部に点火コイルを置いてから通電する

*原稿受付 昭和61年11月10日

昭和61年春季学術講演(昭和61年5月20日)

**正会員 信州大学工学部(長野市若里500)

***TDK㈱(東京都中央区日本橋1-13-1)

****日本電装㈱(愛知県刈谷市昭和町1-1)

図1 実験装置

と、通電によってコイルの温度が上昇するまでの時間に生じる熱を液滴が受けて、液滴の一部が蒸発したり、膨張して、燃焼状況を観察する前に液滴径が変化する。そこで点火コイルの通電直後の影響を少なくするため、点火コイルはあらかじめ通電して高温になったのを確認した後、速やかに液滴の直下に移動させて液滴に点火させる。また、液滴に着火後は直ちにコイルへの通電を止めるとともに、コイルを移動させている。

燃料液滴の燃焼状況は、連続撮影装置を付した35mmカメラと16mm高速度カメラを用いて観察した。35mmカメラの撮影速度は毎秒6コマであり、16mmカメラは毎秒2,000コマである。撮影したフィルムを現像し、拡大した画像から、燃焼状況の観察と燃焼中における液滴直径の変化を計測した。

供試燃料油の分子量分布は、高速液体クロマトグラフを用いて計測し、検出器には紫外吸収検出(UVD)と示差屈折検出(RID)とを併用した。

3. 液滴の燃焼特性

液滴の燃焼特性を検討するには、燃焼過程中的伝熱量を規定する燃焼速度係数と関係する液滴直径の二乗で整理して表わすのが良いとされている。本報告でも、各燃料の燃焼特性を燃焼中における液滴直径の二乗の時間経過で評価している。この方法によれば、石英糸先端に懸垂させる燃料量が多少変わっても、粒径に無関係に特性曲線の勾配により特性を評価できる。

本実験では石英糸先端の球状部に懸垂させた燃料を燃焼させており、画像の液滴を見ても完全な球形ではない。また、画像からは二次元の情報は得られるが、三次元情報は得られない。そこで、液滴を画像から測定される長径と短径を持つ回転楕円体と考え、次式に示す代表直径で整理した。

$$d = 2 \left[\frac{3(V - V_0)^{\frac{1}{3}}}{4\pi} \right] \quad (1)$$

$$V = \frac{\pi}{6} d_A d_B^2 \quad (2)$$

ここで d : 液滴の代表直径, V : 液滴の体積
 d_A : 画像から計測された液滴の長径, d_B : 画像から計測された液滴の短径, V_0 : 石英糸球状部の体積

試験した燃料油は、表1に諸性状を示すように、世界各地の港で船用として供給された25種類の主機関用燃料油と2種類の補助機関用燃料油、それにわが国の製油所で精製された熱分解の高粘度残さ油1種類とFCCスラリボトム油1種類の計29種類である。なお、燃焼特性の整理法についての妥当性を確かめるために、単一組成の炭化水素である n -デカン($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{CH}_3$, 分子量142.29)とベンゼン(C_6H_6 , 分子量78.11)についても試験した。

以下に示す燃焼特性の図は、直径の二乗を縦軸に時間を横軸に取り、燃焼過程中的液滴の挙動として(1)式から求まる代表直径の二乗の時間経過を示したものである。時間零での点は液滴に点火する前に計測したものを表わし、ignitionのところで液滴は着火したことを示す。最後の点は、燃料が消炎した後に石英糸の球状部に残った残さ、セノスフェアを表わしている。完全に燃焼して何も残らなければ、(1)式から代表直径の二乗は零となる。最後の点と最後から二番目の点との間を破線で結んでいるのは、消炎の現象が非常に速く写真撮影ではとらえ難いので、燃焼が観察された最後のコマの観測値と完全に炎が無くなった時とを結んだもので、この2点間で消炎していることを示す。また、この2点の d^2 に大きな差があるケースは低質油燃焼の特長である燃焼末期の液粒飛散があったことを意味している。

実験方法と整理法の参考用として行った単一組成である n -デカンとベンゼンの燃焼特性を図2に示す。図に見られるように、単一組成の液滴燃焼では代表液滴直径の二乗が燃焼時間に対し直線的に減少している。両者の燃焼量に違いがあり、燃焼中は n -デカンが丸味を帯びたやわらかい火炎を形成するのにに対しベンゼンが紡錘形で輝炎を含み、また、消炎後はベンゼンがすすを残すなど、状況に差は見られたが、代表直径の二乗と燃焼時間との関係は両者とも直線を示し、この整理法が妥当なことを示している。

図3に観察された低質油液滴燃焼の写真例を示す。図は試料3の燃料油の燃焼写真であり、(b)の燃焼中期に見られるように、初期から中期にかけて著しい液滴の膨出を示して燃焼を続け、末期には(c)のように液粒の飛散を生じ、消炎後は(d)に示すようにすすの残さを生じている。写真例で示した燃料油の燃焼特性と分子量分布との間にはかなりの相関が見られたので、以下に分類してその特長を例示により述べる。

図4は試料3と23の燃料油の分子量分布と燃焼特性を示す。図4(a)の分子量分布には紫外吸収検出をUVDで示し、示差屈折検出をRIDで示している。以下同様。

表1 試験燃料油の性状

試料番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
補油港	Yokohama	Tokyo	試作高粘度油	Los Angeles	Los Angeles	Los Angeles	Long Beach	Seattle	Los Angeles	Los Angeles	Los Angeles	New York	Savannah	New York	Rotterdam
補油年月	1981.8	1981.4	1980.8	1981.8	1981.5	1981.12	1981.11	1981.4	1981.4	1981.4	1982.4	1981.9	1980.10	1981.5	1981.8
銘柄	IF180	BF280	IF380	CS280	CS280	IF380	IF380	LMFO280	IF280	IF280	IF280	IF280	IF280	IF280	BF280
比重 (15/4℃)	0.9607	0.9621	0.9648	0.9698	0.9632	0.9763	0.9689	0.9805	0.9735	0.9630	0.9956	0.9741	0.9786	0.9815	0.9797
粘度 (50℃) cSt	130.3	315.3	368.9	187.5	280.9	382.8	342.8	256.1	288.0	282.8	240	217.5	218.2	290.6	286.6
流動点℃	+5	+7.5	-10	-5	±0	+5	+7.5	+2.5	+2.5	+10	-5.0	-7.5	-10	-5	+5
引火点℃	94	124	108	92	99	98	110	99	111	82	98	100	108	88	-
硫黄分 wt%	2.77	2.92	3.86	1.54	1.25	1.48	1.41	1.74	1.63	1.52	1.68	1.86	3.86	1.75	3.24
塩分 wt%	0.0045	0.0012	0.31	0.024	0.011	0.0218	0.0040	0.0014	0.0122	0.0082	-	0.0028	0.31	0.0038	0.0096
残留炭素分 wt%	9.22	9.28	11.5	9.05	8.67	9.07	8.47	9.59	8.85	7.22	8.49	11.7	11.5	13.6	11.9
灰分 wt%	0.02	0.03	0.01	0.06	0.06	0.06	0.03	0.01	0.03	0.03	0.08	0.04	0.01	0.04	0.11
水 泥 分 vol%	0.1	0.2	-	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	こん跡	1.3	0.2	-	0.6	0.5
水 分 vol%	0.1	<0.05	0.05	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	<0.05	1.45	0.1	0.23	0.6	0.4
アニリン点℃	~74	~85	73	~65	~68	~66	~66	~72	~59	~66	64	~72	71	~69	~68
キシレン当量%	26~30	16~20	26~30	21~25	21~25	16~20	36~40	16~20	16~20	16~20	36~40	26~30	41~45	21~25	31~35
n-ヘプタン不溶分 wt%	4.10	5.52	-	4.15	4.86	4.18	5.45	3.41	4.19	2.47	3.67	6.91	-	5.64	7.36
トルエン不溶分 wt%	0.03	0.30	-	0.08	0.06	0.06	0.01	0.19	0.05	0.02	-	0.11	-	0.36	0.14
アスファルテン wt%	4.07	5.22	-	4.07	4.80	4.12	5.44	3.22	4.14	2.45	3.56	6.80	記入なし	5.28	7.22
ディーゼル指数	25.9	28.6	24.0	21.3	23.6	20.1	22.6	20.6	19.3	23.3	15.6	22.1	21.0	19.6	19.88
総発熱量 kcal/kg	10,300	10,310	-	10,300	10,380	10,300	10,350	10,500	10,560	10,650	10,050	10,190	-	10,470	10,140
C (計算) wt%	85.3	85.2	-	86.6	86.7	86.7	86.7	-	-	-	-	86.3	-	-	85.2
H (計算) wt%	11.1	11.1	-	11.1	11.2	11.0	11.1	-	-	-	10.6	11.0	-	-	10.8
平均数	290	330	239	260	350	290	320	240	280	330	101	250	101	290	290
分子平均	350	400	244	320	380	340	360	280	340	370	121	330	124	370	360
重量平均	1030	1290	1320	880	1000	900	850	760	890	940	589	960	990	1060	950
分子量	1090	1300	1560	1000	960	980	890	840	940	890	741	1160	1050	1330	1080

試料番号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
補油港	Rotterdam	Antwerp	Le Havre	Durban	Durban	Singapore	Jeddah	Singapore	Jeddah	Damman	試作スラリ油	Rotterdam	Durban	Singapore
補油年月	1981.8	1981.11	1981.9	1981.6	1980.7	1981.10	1981.12	1981.4	1981.5	1981.11	1980.12	1980.9	1981.6	1981.4
銘柄	IF380	IF180	IF180	MFO180	BFO180	IF180	IF120	MDO180	IF120	IF180	FCC スラリボトム	IF380	MDO	MDO
比重 (15/4℃)	0.9809	0.9907	0.9731	0.9834	0.9930	0.9560	0.9475	0.9693	0.9627	0.9518	1.0082	0.9961	0.8940	0.9069
粘度 (50℃) cSt	381.4	199.4	160.8	181	209	189.8	121.8	181	115.1	142.1	31.47	372.7	4.00	8.53
流動点 ℃	+5	-2.5	-12.5	-15.0	-	+17.5	+10	+7.5	±0	+15	30	-2.5	+2.5	-12.5
引火点 ℃	92	95	73	-	81	110	100	-	85	108	96	98	97	86
硫黄分 wt %	3.27	3.49	3.44	2.89	3.00	3.23	3.19	3.39	3.52	3.20	0.98	3.08	1.63	1.53
塩分 wt %	0.0045	0.0015	0.0058	-	<0.001	0.0049	0.0020	-	0.0013	0.0010	-	-	0.0005	0.0006
残留炭素分 wt %	11.8	13.5	12.6	17.1	16.5	8.93	7.65	13.0	9.04	7.69	4.53	18.0	0.01	1.05
灰分 wt %	0.03	0.04	0.02	0.06	0.04	0.03	0.01	0.04	0.01	0.02	0.035	0.08	-	-
水泥分 vol %	0.3	0.1	0.2	こん跡	2.00	0.2	0.1	こん跡	0.1	0.05	-	1.20	-	-
水分 vol %	0.2	0.1	0.1	こん跡	0.10	0.10	0.10	こん跡	<0.05	0.05	<0.1	1.70	こん跡	こん跡
アニリン点 ℃	~73	~82	~70	54.8	76	~81	~79	71.6	~72	~82	-	-	57.6	62.8
キシレン当量 %	21~25	55~60	31~35	56~60	56~60	21~25	16~20	51~55	16~20	16~20	-	-	-	-
n-ヘプタン不溶分 wt %	6.84	0.23	6.70	-	-	4.49	2.93	-	3.60	3.15	-	11.84	-	-
トルエン不溶分 wt %	0.23	0.05	0.07	-	-	0.12	0.07	-	0.01	0.04	-	-	-	-
アスファルテン wt %	6.61	0.18	6.63	11.4	12.32	4.34	2.86	6.3	3.59	3.11	-	-	-	-
ディーゼル指数	20.7	20.2	21.9	16.1	19	29.2	30.9	23.1	24.9	30.7	-	-	36.2	35.4
総発熱量 kcal/kg	10,600	10,100	10,180	10,170	-	10,310	10,350	10,210	10,240	10,330	10,020	-	10,510	10,520
C (計算) wt %	84.9	85.1	84.9	-	-	84.9	84.8	-	84.7	84.8	-	-	C/H 比	C/H 比
H (計算) wt %	10.8	10.6	10.8	-	-	11.1	11.3	-	11.0	11.2	-	-	7.1	7.1
平均数	290	250	290	300	152	320	320	350	290	320	150	350	140	180
均分	350	370	330	340	164	390	340	380	370	380	160	350	150	210
分子	1040	770	950	960	954	940	910	920	790	870	170	1130	150	300
重量平均	1090	1010	1040	1060	1010	1130	930	960	950	920	200	990	180	300

試料 3 の燃料油は、表 1 に見られるように、試作高粘度油であって船用燃料油として市販されたものではなく、一般の船用燃料油と比較考察することに多少問題はあるが、今後船用燃料油として登場することが考えられるので、検討に加えている。試料 3 の分子量分布を見ると、分子量約 50 から 15,000 までの範囲に幅広く、しかもなだらかな分布をしている。一般船用燃料油中には、これ程広い分布を持つ燃料油は見当たらないが、なだらかで丸まったという似かよった分布パターンを持つ試料 23 の

結果を合わせて図 4 に示す。同図(b)に示すように、このような分子量分布を持つ燃料油の燃焼特性は、燃焼初期から中期にかけて液滴が膨張する試料 3 の例のようなものもあるが、一般に着火後から消炎する直前まで液滴径の変化が見られず、最後に中程度の液粒飛散をして消炎に至る。消炎後は残さやセノスフェアが比較的多い。この型をタイプ I とする。

図 5 は例として試料 4 と 12 の燃料油の分子量分布と燃焼特性を示し、この型をタイプ II とする。この型の燃料

(a) *n*-デカン (分子量 142.29)

(b) ベンゼン (分子量 78.11)

図 2 単一組成炭化水素の燃焼特性

(a) 着火直後

(b) 燃焼中期
(着火後 0.67 秒)

(c) 燃焼末期
(着火後 1.50 秒)

(d) 消炎後

図 3 燃焼写真 (試料 3)

(a) 分子量分布

(b) 燃焼特性

図 4 分子量分布と燃焼特性 (その 1)

(a) 分子量分布

(b) 燃焼特性

図5 分子量分布と燃焼特性 (その2)

油は、分子量分布を図5(a)に示すように、分子量で中程度のものが減少している2山形のパターンをしている。このパターンは、いわゆる中抜きと呼ばれているもので、常圧または減圧蒸留で生成される残さ油のみからの製品ならば様な分布をするはずであり、同図は低粘度と高粘度の残さ油を混合して作られた燃料油であることを示している。この種の燃料油の燃焼特性は、図5(b)に見られるように、液滴径の二乗は燃焼中期まで一様に減少するが、その後燃焼末期に激しい液粒飛散をして消失する。消失後は残さ、セノスフェアとも多い。

第3のタイプⅢは図6に示し、代表例として試料7と10をあげる。この型は、分子量分布を図6(a)に示すように、鋭い1山形をなし、燃焼特性は同図(b)のように、液滴直径の二乗が時間とともに一様に減少しており、燃焼末期の液粒飛散は見られない。すすやセノスフェアの残留も少ない。低質油の中では良好な燃焼特性を有する、と言える。

試料油中に補機用燃料として船用ディーゼル油があり、試料28と29がそれにあたる。この2種の試料油の分子量分布と燃焼特性を図7に示す。分子量分布は、図7(a)に示すように、鋭い1山形をなし、単一組成燃料に近い。燃焼特性は、同図(b)に見られるように、図2に示した単

一組成燃料に相似しており、液粒飛散は観察されなかった。この型をタイプⅣとする。

以上を要約すると、表1に示す燃料油の性状の中で平均分子量を除く従来測定されている性状値では、上述の燃焼特性との関連は見られず、図4～7に示したように、分子量分布のパターンが似ている燃料油は燃焼特性も似たパターンを示すことがわかった。29種類の燃料油について分子量分布と燃料特性を上記のタイプで類型化すると、2例を除き4タイプにおさまる。すなわち、
タイプⅠ……分子量分布が1山形で丸味を帯びている。

高分子の物質の量も比較的多い。

燃焼特性は、分子量が小さいものを含む油は初期と中期に液滴が膨張するが、一般に液滴径の変化が無く、末期に中程度の液粒飛散を起こす。消失後の残さが多い。

試料1, 2, 3, 5, 6, 9, 21, 23がこの範ちゅうに入る。

タイプⅡ……分子量分布が2山形で、中程度の分子量の物質が少ない。2種類以上の残さ油を混合して生成したと見られる。

燃焼特性は、燃焼中期にやや燃焼が弱く、末期に激しい液粒飛散を見せるのが特長で

(a) 分子量分布

(b) 燃焼特性

図6 分子量分布と燃焼特性 (その3)

(a) 分子量分布

(b) 燃焼特性

図7 分子量分布と燃焼特性(その4)

ある。極端な場合は、中期で吹き消えることもある。消炎後の残さが多い。

試料4, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24, 27がこの型に含まれる。

タイプⅢ……分子量分布が鋭い1山形をなす。ただし分布は分子量が約100から約10,000にわたる。燃焼特性は、低質油としては比較的に良い部類に属し、消炎後の残さも少ない。

試料7, 10, 11, 22, 25

タイプⅣ……船用ディーゼル油と呼ばれるもので、わが国の規格でA重油に属する。

分子量分布は分子量で100から1,000の間の物質から成って、分布形状が非常に鋭い1山形を示す。

燃焼特性は、燃焼速度は遅いが、単一組成燃料と似ている。液粒飛散は観察されず、消炎後の残さは極く小量である。

試料28, 29がこの型に属する。

試験をした試料油29種類の中で、上記4タイプに分類できなかったのは、試料8と26である。試料8は、分子量分布がタイプⅡに含まれるにもかかわらず、燃焼特性はタイプⅠに近い。また、試料26はFCCスラリーボトム油であり、分子量分布がタイプⅣのA重油に近い分布をしているのに、燃焼特性はそれ程良くはなく、むしろタイプⅢに近い燃焼をする。

4. 液粒の飛散現象

低質油の液滴を燃焼させると、燃焼中に液滴が爆発的にさらに細い液粒となって飛散すること、はこれまでも報告があり、これが低質油燃焼の特長とも言われていた。

今回の実験でも、先に述べたように、タイプⅠとⅡは燃焼末期に液粒飛散を生じて消炎している。すなわち、分子量分布で高分子物質の含有量が多い燃料油と2山形のパターンをなす燃料油は必ずといって良い程、末期で液粒飛散を起こしている。この機構については考察の項

で検討を行う。

一方、二、三の燃料油では、燃焼末期の液粒飛散を生じる上に、初期にもしばしば液粒飛散を起こす。燃焼初期における液粒飛散の現象は、末期のそれと比べると進行が速やかで、3/100秒程度で完了してしまう。毎秒6コマの35mmカメラの観察ではその全容を把握できないので、毎秒2,000コマの16mm高速度カメラによる観察を加えた。

燃焼初期の液粒飛散は、タイプⅠの燃料油の燃焼で必ず起こるとは限らない。図3の例の時のように、液滴の肥大だけで燃焼を続行する場合があります。また、液粒飛散にしても爆発的に激しく飛散を行う時があったり、内部から液粒が1～2粒飛び出すだけでその後は通常の燃焼を行うなど、条件により現象は異なる。低分子物質の量が多いと初期の液粒飛散に結びつくようである。

観察できた燃焼初期の液粒飛散現象の写真を図8に示す。この燃料油は試料3である。同図から観察されるように、試料3の燃料油は着火後310/1,000秒までは通常の液滴燃焼をした後、312.5/1,000～315/1,000秒という着火後の早い時期に液滴が突如爆発的に激しくはじけ、数十の微細液粒となってそれぞれが燃焼し始める。その激しさで最初の液滴本体の燃焼が認め難い。飛散液粒が浮遊しながら火花のようにして燃焼し終るのが約30/1,000秒間であり、着火後350/1,000秒からは液滴本体が(19)に示すような通常の液滴燃焼の状態を続け、着火後1,340/1,000秒で消炎に至っている。この液粒飛散現象は、はじけてから浮遊液滴が燃焼終了するまで約30/1,000秒間という短い時間であって、肉眼での観察でははじけがあった、としか認識できない一瞬の現象である。

これに比べると、燃焼末期に現れる液粒飛散ははるかにゆっくりとした現象で、飛散する液粒の数が数個と少ない。これから判断すると、同じ液粒に飛散して燃焼する現象であるが、その生成機構には違いがあると考えられる。

5. 考 察

液滴の燃焼は、燃料の液滴を蒸発させるための熱伝達で始まり、蒸発した燃料の可燃性ガスと空気との混合、燃料の熱分解、酸化反応、熱発生と続き、最後に消火に至る多くの反応の連続である。このように複雑な熱を含む反応過程の連鎖である燃焼でも、単一組成燃料の液滴燃焼では、伝熱による液体の蒸発速度が律速となって反応全体をほとんど支配し、液滴直径の二乗が時間とともに直線的に減少する現象となって現れること、が報告されている⁵⁾。

多くの炭化水素の混合物である一般の燃料油では、単一組成燃料液滴と似た燃焼特性を示すものがある一方、

低質油に特有と言われている複雑な燃焼特性を示す燃料油がある。この特性を支配するのは燃料油の性状によるが、中でも燃料を構成する炭化水素それぞれが影響し合って全体の特性を決定している。そこで、燃料油の分子量分布と燃焼特性との関係を求めたのが本報告である。燃料油の分子量分布は高速液体クロマトグラフによる計測を整理しており、検出器として紫外吸収検出と示差屈折検出とを併用している。この中、紫外吸収検出はパラフィン系炭化水素に不感であるが、不飽和物質や芳香族類には選択的に敏感である。一方、示差屈折検出はすべての物質が検出できる特長がある。燃焼過程では、炭化水素の鎖が熱により切れて低分子の基を形成するが、鎖をつないでいる結合エネルギーは、直鎖パラフィン、分岐

〔数字は着火後の経過時間(秒)〕

図8 初期液粒飛散現象写真

パラフィン、オレフィン、ナフテン、芳香族などによって異なり、熱分解の仕方に差を生じる。この理由から、2者の検出方法を用い、実験の整理にも両者による分子量分布を併記した。燃焼特性では、 C/H 比が小さい直鎖パラフィン系燃料は丸味を帯びたやわらかな感じのする火炎であるのに対し、 C/H 比が大きい芳香族系燃料は紡錘形で輝炎を含む硬い感じの火炎を形成する。これは図2で説明した。熱分解では、結合エネルギーが大きい芳香族系が後に分解し、直鎖パラフィン系のメタン基は結合エネルギーが小さいことから先に分解する⁶⁾。

重油液滴の燃焼が単一組成のそれと異なる様相を示すことは、これまでも多くの報告がある²⁾³⁾⁴⁾。しかし、重油燃料といっても低質油となると既述のように分子量分布だけを見てもいろいろなパターンを示し、燃焼特性が異なるのは当然とも言える。極端な例では、タイプIIの燃料油で燃焼中に燃焼が極度に低下し、数度吹き消えしかかって再び燃焼する、といった燃焼の不連続を示したのもあった。これは、中位の分子量物質が少ないことによると考えられる。

今回の実験で、燃焼中に液粒の飛散現象が数多く観察された。それも燃焼末期だけでなく燃焼初期にも観察されている。重油の液滴を燃焼させると、燃焼末期に液粒を飛散させることはこれまでの報告にもある²⁾³⁾⁴⁾。その機構の説明として、燃焼過程中に揮発性成分の大部分が蒸発した後、液滴には粘度の高いものが残り、それが気化と分解でガスを中に含むあわを生成し、そのあわの破裂で粘り粒の一部を外部へ飛散させる、との推定を述べている。この時期での液滴は、すでに高温雰囲気中にある期間曝されており、炭化水素の中で水素が付いた基が熱分解で取り払われた後の水素分が少ない高分子の炭火水素となっている。このような炭火水素は、半固体化しており、破裂を生じて飛散しても燃焼をそれ以上継続できずに、すすの生成へとつながる。したがって、燃焼末期での液粒飛散現象は、燃焼を良くする方向ではなく、むしろ、すすやセノスフェア形成を促進して燃焼を不良とする、と考えられる。

これに対し、燃焼初期に生じる液粒飛散現象は機構が異なる。初期に液粒飛散を起こす燃料油は、低分子量物質の含有量が比較的多い燃料油であることから推定すると、液滴内部に含まれていた低分子量物質が加熱を受けて蒸発温度に達し、その蒸気圧力で液滴を爆発的に破裂させ、細い液粒を外部へ飛散させると見られる。この際、油滴の粘度はそれ程高くないから、細い粒を多数放出する。この例が試料3による図8の燃焼写真であり、飛散をしない時でも、図4に示すように、液滴は著しい膨張を燃焼中期に見せている。これらの現象は乳化燃料でのマイクロ爆発の機構と類似している⁷⁾。したがって、この時期に生じる液粒飛散は、すすの生成よりも微粒化の効果が大きく、燃焼を改善する方向へ向いていると考えら

れ、積極的にこれを促進する技術の開発が今後必要となろう。

6. 結 言

船用低質燃料油の単一液滴について燃焼実験を行い、液滴の燃焼が微細でしかも早い現象であることから、長さや時間のスケールを拡大して詳細に観察した結果、次のことがわかった。

- (1) 船用低質油の燃焼特性は分子量分布のパターンと深い関連があり、燃料油の分子量分布がわかれば燃焼特性をある程度推定できる。
- (2) 燃焼末期に液粒を飛散させる燃料油であるか、否かは分子量分布の形状から推測できる。
- (3) 燃焼初期に起きる液粒飛散現象は、低分子量物質の含有によると考えられる。
- (4) 分子量分布の計測には紫外吸収検出と示差屈折検出を併用するのが良く、それによって燃焼特性を幅広く推測できる。

本実験は、大気圧下の常温空気中で、直径約1mmの低質液滴を石英糸に懸垂し、外部から点火コイルによる熱で液滴燃焼を行わせた。実際のディーゼル機関では、燃焼室内の雰囲気条件が高圧でしかも高温で、限られた空間中に無数の液滴が空気と相対速度を持って浮遊しながら燃焼する。また、ノズルから噴射された液滴径は50～100 μm と実験より1桁小さい。

以上のように、燃焼の環境条件は実験と実際の場とでは大幅に異なっているが、この実験と整理分析で船用低質燃料油の燃焼特性は定性的に把握できたといえよう。すなわち、燃料油の燃焼特性はどのような因子によって影響を受けるか、低質油の燃焼を改善するにはどのような対策を採れば良いか、に対し、本研究が方向を与えたと考える。

謝 辞

実験装置の製作にあたり、東京商船大学助教授岡田博氏から懇切なご指導を賜りました。ここに深く感謝します。

文 献

- 1) 玉木, 日本造船学会誌, 第629号(昭56-11), 556.
- 2) 小林, 日本機械学会論文集, 20-100(第2部), (昭29), 837.
- 3) 内海, 日本機械学会誌, 64-508(昭36-5), 728.
- 4) 伊藤・河野・飯沼, 船機誌, 17-6(昭57-6), 534.
- 5) 小林, 日本機械学会論文集, 20-100(第2部), (昭29), 831.
- 6) Katsoulakos, P. S. et al., 16th CIMAC Paper D58 (June, 1985).
- 7) 中村・岡田・内海, 船機誌, 18-1(昭58-1), 34.