舶用重油の燃焼時間と諸要素との関係例

技術研究所　橋本高明　佐々木千一

１．まえがき

ディーゼルエンジンが満足に運転出来なくなった場合、それは必ずしも燃料油が原因ではないことは明らかである。しかしながら、中には燃料油以外に原因が見つからないケースもある。

著者らは、運航上トラブルが生じた時に使用されていた燃料油試料を幾つか入手出来たので、それらと問題が報告されていない試料油との比較を燃焼実験により行った。実際には、機関にトラブルが発生した時に使用されていた燃料油でも、燃焼実験において明らかに異常な数値を示したサンプルの他に、正常と思われる数値を示したサンプルもあった。機関にトラブルが生じた(又はその可能性がある)時に使用されていた燃料の実測値と、異常が報告されていない燃料の平均値を示し、今後の調査・研究の参考に供したい。

燃焼実験には FIA100 と称する装置を用いた。今回は、燃焼実験結果と燃料油の主な分析値との関係を比較検討した。

２．燃焼実験装置と実験条件

燃焼実験装置 FIA100 は、１気筒／１穴の燃料噴射弁１本を装着したディーゼルエンジンを模した装置である。最大の違いは、ピストンを持たない定容積での燃焼という事が出来る。この装置の信頼性に付いては、ISME2000 で報告(Paper No. TS63, P398, Figure 1)したので省略する。

実験条件を次に示す。

筒内(燃焼室)圧力	：	45 bar (4.5 MPa)
筒内温度	：	450 ℃ (723 K)
冷却水温度	：	80 ℃ (353 K)
試料油加熱温度	：	120 ℃（393 K、180 クラス重油に対して）
		128 ℃（401 K、380 クラス重油に対して）
		130 ℃（403 K、500 クラス重油に対して，但し１試料油のみ）
噴射圧力	：	200 bar (20 MPa)
使用空気	：	高純度圧縮空気(G3, 14.7 MPa)

備考：　噴射ノズルにおける粘度を、目標 17 mm^2/s とすべく、各クラス油の加熱温度を設定した。噴射は 10 数回行い、ANSI/ASME PTC19.1-1985 にて異常値を除去後平均値を求めた。

３．検討対象項目

燃焼実験では、着火遅れ時間(ms)、燃焼最高圧力(bar、以下 Pmax と略す)、Pmax に至る時間(ms)

表1　異常が報告されたケースの分析・燃焼実験結果例

No.	船舶ID	着火遅れ時間、ms	最高燃焼圧力、bar	燃焼時間、ms	粘度@50C mm2/s	密度@15C kg/m3	CCAI	C／H比	アスファルテン分 ％m	残留炭素分 ％m	平均分子量 M	%Cp/%Ca 比	補油地	備考
1	OC	11.5	57.9	38.9	237.0	993.4	859	8.46	10.32	16.9	396	1.09	Capetown	異常摩耗　c11
2	NC	11.8	57.4	37.8	487.9	1008.2	867	8.56	7.31	15.2	458	1.01	Rotterdam	排ガス高温　c165
3	AS	9.0	57.5	36.9	333.6	−	−	8.25	8.83	14.9	−	−	N. Orleans	異常摩耗　c12
4	AB	9.5	57.6	32.7	340.7	991.0	853	8.35	6.42	12.6	407	1.09	L'g Beach	排ガス高温　c115
5	AB	8.4	57.6	32.5	278.9	994.0	858	8.22	9.69	17.8	408	1.16	L'g Beach	排ガス高温　c118
6	AB	8.3	57.4	30.9	279.7	991.3	856	8.56	10.50	15.1	403	1.08	L'g Beach	排ガス高温　c117
7	SM	9.0	58.0	30.8	136.8	989.2	862	8.45	2.82	11.0	377	1.08	内地	NA　c146
8	C	7.2	57.6	29.8	156.9	977.0	848	8.26	8.36	14.8	386	1.21	L'g Beach	異常摩耗、排ガス高温　c83
9	SA	10.2	58.1	29.5	172.3	994.2	864	8.56	4.31	9.0	384	0.97	内地	NA　c170
10	BS	9.1	57.5	28.9	353.4	989.5	851		4.59	11.3	410	1.16	Singapore	異常摩耗　c186
11	SA	10.4	57.5	28.6	133.9	989.2	862	8.57	2.56	10.0	377	1.07	内地	排ガス高温　c151
12	SA	9.9	57.1	28.1	177.3	989.3	859	8.22	3.38	10.0	385	1.08	内地	排ガス高温、ライナ偏摩耗　c112
13	HC	7.6	58.0	28.1	151.7	991.4	863	8.54	12.10	18.8	380	1.06	Durban	ライナー亀裂　c65
14	OR	7.2	57.4	27.6	166.9	986.5	857	8.57	7.17	−	384	1.13	Antwerp	異常摩耗　c99
15	SO	7.4	58.0	27.5	337.0	988.9	851	8.07	8.52	18.7	408	1.17	Houston	T/C汚れ大サージング　c102
16	KM	10.0	58.2	27.5	194.0	984.1	852	8.00	1.55	10.0	386	1.18	内地	NA　c53
17	ToM	9.6	58.2	27.3	189.5	979.9	848	8.00	4.22	12.1	394	1.26	内地	NA　c15
18	RY	7.1	57.9	25.5	399.1	983.2	844		5.05	16.6	415	1.23	Singapore	異常摩耗　c184
19	EE	7.3	58.4	25.2	435.0	983.1	843	8.21	4.61	11.5	418	1.07	L'g Beach	(機関不調)NA　c50
20	AL	7.3	58.1	24.7	321.2	985.1	848	8.31	4.93	14.3	407	1.23	Singapore	異常摩耗　c141
21	TM	7.2	58.0	24.0	386.0	991.1	852	8.16	6.47	16.5	412	1.16	Fujairah	NA　c145
22	TM	10.0	58.0	22.6	397.1	982.8	843	8.08	1.73	10.6	417	1.18	内地	NA　c144

NA：　詳細未公表。又は、異常との関連調査中。

の３点が取り出せる。

本稿では、着火遅れ時間と燃焼時間に関わる項目として、密度、Calculated Carbon Aromaticity Index(CCAI と略す, 着火性指数)、炭素重量と水素重量の比(以下 C/H 比と略す)、アスファルテン分%、残留炭素分%、平均分子量、パラフィン鎖炭素含有率(%Cp)と芳香族環炭素含有率(%Ca)の比(以下%Cp/%Ca 比と略す)の関係を求めた。 Pmax や硫黄分は大きな差が無いように見えたので検討から外した。尚、着火遅れ時間は筒内圧力が 0.2bar 上昇した時点とし、燃焼時間は Pmax に至る時間から、着火遅れ時間を引いた値を採用した。

４．実験結果と諸要素との関係

今回は 180 及び 380 クラス重油を主体として、計 80 サンプルの実験結果につき報告する。

本船から報告があった代表的な障害の例と、その時点で使用されていた燃料油のサンプルの分析・実験値を表１に示した。但し、燃料油が障害の原因であったか否かの結論が出ている訳ではない。

正常な機関運転がなされていたであろうと思われる試料油の分析・実験値はその平均値を表２に示した。（備考：180 又は 380 クラスのいずれにも入らない粘度のもの等、数件のサンプルは平均値の計算から外した。）

表２　異常が報告されなかったケースの分析・燃焼実験結果例

	着火遅れ時間 ms	最高燃焼圧力 bar	燃焼時間 ms	粘度@50C mm²/s	密度@15C kg/m³	CCAI	C/H 比	アスファルテン分 %	残留炭素分%	平均分子量 M	%Cp/%Ca 比
180 クラス油の平均値(29 件)											
	6.8	58.2	20.8	167.5	959.4	829	7.66	3.99	11.20	398	1.55
(s)	*0.8*	*0.5*	*3.1*			*13*	*0.28*	*1.02*	*1.48*	*8*	*0.22*
380 クラス油の平均値(22 件)											
	6.2	58.2	20.8	372.1	973.9	835	7.69	5.01	12.36	419	1.39
(s)	*0.8*	*0.4*	*1.8*			*10*	*0.31*	*2.22*	*2.80*	*7*	*0.14*

注：　*s = 標準偏差*

4.1　着火遅れ時間と諸要素との関係

着火遅れ時間が長すぎる事は燃焼上好ましくないことは経験上知られている。故に、着火遅れの指標として、長年 CCAI 値がその検討に使用されてきた。事実それなりの高い相関性を示しており、CCAI は一般分析値から求めうる事を考えると、着火遅れの検討には良い手法の一つといえる。

表３に、異常値と正常値を示した全サンプルの着火遅れ時間に対する諸要素の寄与率(R^2)を示した。

表３　燃焼実験値に対する諸要素の寄与率

燃焼実験項目 諸要素	着火遅れ時間、ms	燃焼時間、ms	分析数、n
	R^2	R^2	
C／H比	**0.4738**	**0.5437**	74
CCAI	**0.4569**	**0.5689**	77
%Cp/%Ca 比	0.4006	0.5030	72
密度	0.3466	0.5049	77
残留炭素分	0.0210	0.1981	76
アスファルテン分	0.0211	0.2491	77
平均分子量、M	0.0579	0.0165	72

寄与率からいえば、C/H 比及び CCAI が最も高い寄与率を示した。故に、C/H 比の分析値を得ることも着火遅れの検討には極めて有意義であると判断される。

又、残留炭素分やアスファルテン分は着火遅れ時間には全く関係を持っていないと言っても良さそうである。

平均分子量、M、も着火遅れ時間と無関係である事が判った。

着火遅れ時間（Y）と諸要素（X）との関係をあえて数式で表現するとつぎのごとくであり、着火遅れの予測に適用しうるかも知れないと考えられる。

Y = 2.616X(C/H 比)－13.343
Y = 0.070X(CCAI) – 51.089
Y = -3.988X(%Cp/%Ca 比) + 12.725
Y = 0.055X(密度)－ 46.549

実際、本船上で問題が生じている試料油の着火遅れ時間もかなりの幅があり、現時点でそのしきい値を述べることは未だ出来ない。しかしながら、状態の良い例の着火遅れ時間の平均値が 7 ms 以下であるので、8 ms 以上はおそらく確実に要注意といえると考えられる。

4.2　燃焼時間と諸要素との関係

おそらく、着火遅れ時間にもまして燃焼上重要なものは燃焼時間であろうと思われる。ロングフレイムの場合は特に、燃焼室まわりの潤滑を阻害するおそれが有るからである。

全サンプルの燃焼時間と諸要素の寄与率(R^2)を表３に示した。燃焼時間には CCAI と C/H 比が格段に関与している事が判る。燃焼性が良いと考えられるパラフィニック系炭素と燃焼性が劣ると考えられる芳香族系炭素の重量比や密度も、燃焼時間との検討には有意義なものと判断される。

更に、燃焼時間には着火遅れ時間に関係が無かったアスファルテン分及び残留炭素分もそれなりに関

わっていることを示している。平均分子量、M、は燃焼時間にも全く無関係である事が判った。

燃焼時間（Y）と諸要素（X）との関係も数式化を試みると次のごとくになる。燃焼時間の予測に適用しうる可能性がある。

Y = 9.066 X(C/H 比)－47.887
Y = 0.391 X(CCAI) – 306.27
(但し、CCAI≧830 の領域において)
Y = 0.207 X(密度)－178.21
Y = - 26.591 X(%Cp/%Ca 比)＋57.918
(但し、%Cp/%Ca≦1.5 の領域において)

問題が生じた燃料油の燃焼時間にもかなりの幅がありそのしきい値は未だ特定できない。しかしながら、良い事例の平均値が 21 ms 以下であるので、24 ms 以上は要注意であり、28 ms 以上は危険領域といえると思われる。

4.3　燃焼終了時間とシリンダボアとの関係

今後の検討事項としては、着火遅れ時間＋燃焼時間（噴射から燃焼終了までの時間＝燃焼終了時間と称する）とシリンダボアとの関係も調査する予定である。一部であるが、現時点で得ているデータを中間報告する。

表４は、表１中でボア 600mm 以上の２ストロークエンジンを抜粋したものである。表５は同じエンジン条件で正常燃焼であったものの関係を示している。 当然のことながら各エンジンの１回あたりの燃料噴射量は異なっているので、厳密には FIA100 の噴射量にての比較は無理を含んでいるが、現時点であえてそれを行ってみた。

表４　問題船の燃焼終了時間と２ストロークディーゼルのボア(600mm 以上)との関係

表１中の No.	船舶 ID	着火遅れ時間、①	燃焼時間、②	①＋②＝③ 燃焼終了時間、 ms	シリンダボア、 mm	ボアx0.5 ＝④	④÷③ ボア／燃焼終了時間比
1	OC	11.5	38.9	50.4	620	310	6.16
2	NC	11.8	37.8	49.6	900	450	9.07
4	AB	9.5	32.7	42.2	800	400	9.48
5	AB	8.4	32.5	40.9	800	400	9.78
6	AB	8.3	30.9	39.2	800	400	10.2
13	HC	7.6	28.1	35.7	600	300	8.4
19	EE	7.3	25.2	32.5	620	310	9.54
20	AL	7.3	24.7	32.0	600	300	9.38
21	TM	7.2	24.0	31.2	840	420	13.46
22	TM	10.0	22.6	32.6	840	420	12.88

（備考：No.13 のみ 180 クラス重油）

表４と表５は未だデータ数が少なく、考察が出来る状態ではないが、その傾向のみに着目すると、

表４中の No.21 及び No.22 を除けば、ボア(X0.5)／燃焼終了時間比はほぼ 10 以下であり、一方、表５のそれは、12 以上が圧倒的に多い。故に、或る程度ボアの大きいエンジンの場合、シリンダ径と燃焼終了時間の間に何らかの関係が成りたつ可能性もあるかもしれない。
この件のしきい値の決定にはさらなるデータの蓄積が必要である。

表 5　正常油の燃焼終了時間と２ストロークディーゼルのボア(600mm 以上)との関係

元帳試料番号	船舶 ID	着火遅れ時間、①	燃焼時間、②	①＋②＝③ 燃焼終了時間、 ms	シリンダボア、 mm	ボアｘ0.5＝④	④÷③ ボア／燃焼終了時間比
＃3	HB	8.5	24.3	32.8	800	400	12.20
＃6	S	6.2	22.5	28.7	800	400	13.94
＃9	DI	6.8	21.3	28.1	850	425	15.12
＃28	IM	6.3	23.1	29.4	850	425	14.46
＃32	J	6.8	24.4	31.2	760	380	12.18
＃34	TO	5.1	18.8	23.9	620	310	12.18
＃40	DI	4.9	19.9	24.8	850	425	17.14
＃52	AB	6.7	21.6	28.3	800	400	14.13
＃53	DI	6.1	21.3	27.4	850	425	15.51
＃55	S	6.0	18.5	24.5	800	400	16.33
＃56	S	5.8	20.5	26.3	800	400	15.21
＃58	AB	7.1	22.0	29.3	800	400	13.75
＃59	AL	6.4	19.6	26.0	600	300	11.54
＃68	S	6.8	18.9	25.7	800	400	15.56
＃69	S	5.3	18.8	24.1	800	400	16.60

（備考：全試料、380 クラス重油）

5.　あとがき

参考まで、燃焼カーブの例、熱発生率カーブの例、および統計上のグラフの例をそれぞれ図１、図２，図３、及び図４、図５として紹介した。

図１から図３については、その曲線において問題発生重油と正常重油のあいだに大きな差が読み取れる。図４については、CCAI が 830 以下の場合、CCAI と燃焼時間との間に相関性は低いことが判る。

図 5 のＣ/H比と燃焼時間との関係はデータが増えれば、回帰線図の勾配がもう少し大きくなるのではないかと考えられる。

この燃焼実験には、船主、機関メーカ等多くの関係者からの情報が欠かせない。今後も、ご協力を得ながら更なるバックデータの蓄積に努力し、将来より精度の高い報告を行いたく考えている。

今回の実験値内で仮に結論付けるとすれば、次のことがいえると思われる。

１）　燃焼の検討には、炭素／水素比は有効であり、C/H 比=8.0 以上は要注意領域である。

２）　着火遅れ時間に、アスファルテン分及び残留炭素分は関わりが極めて低い。

３）　重油の平均分子量と着火遅れ時間、燃焼時間とは無関係である。

４）　着火遅れ時間 8 ms 以上、燃焼時間 28 ms 以上は機関運転上問題が生じる可能性がある。

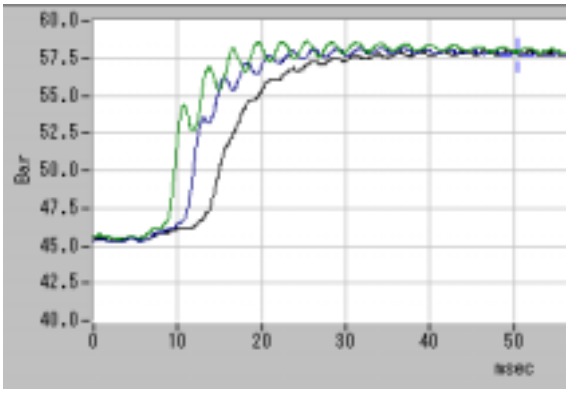

図１　燃焼カーブ　例 1

船舶は異なる。

最上段のカーブ：　①　欧州積み重油の例

中段のカーブ　：　②　欧州積み重油の例

最下段のカーブ：　③　米国積み重油の例

表１、No.15.　T/C サージング等

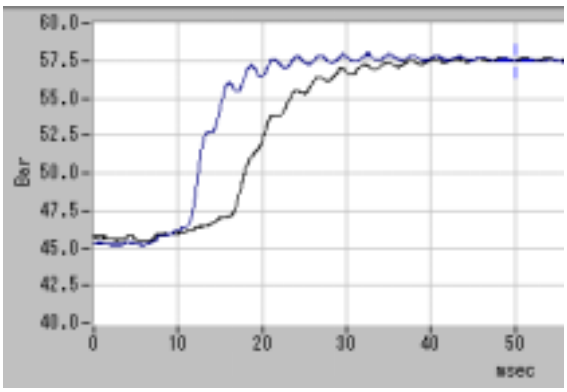

図２　燃焼カーブ　例２

同一船舶。

上段のカーブ：　①　欧州積み重油

下段のカーブ：　②　米国積み重油

表１、No.4.　排ガス温度約 10℃高い

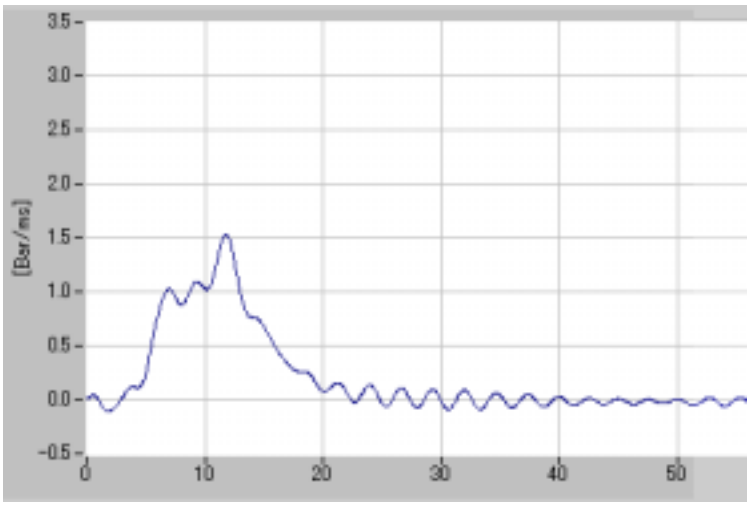

図３-1　熱発生率カーブ

図２中の　①　欧州積み重油

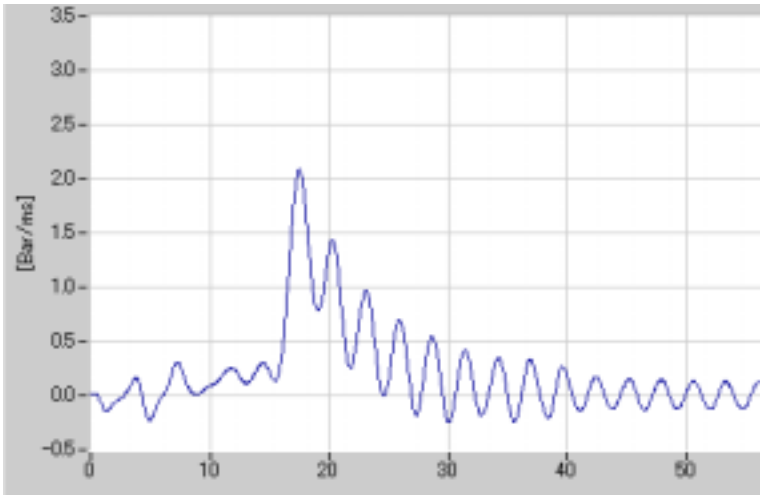

図 3-2　熱発生率カーブ

図２中の　②　米国積み重油

表１、No.4.　排ガス温度約 10℃高い

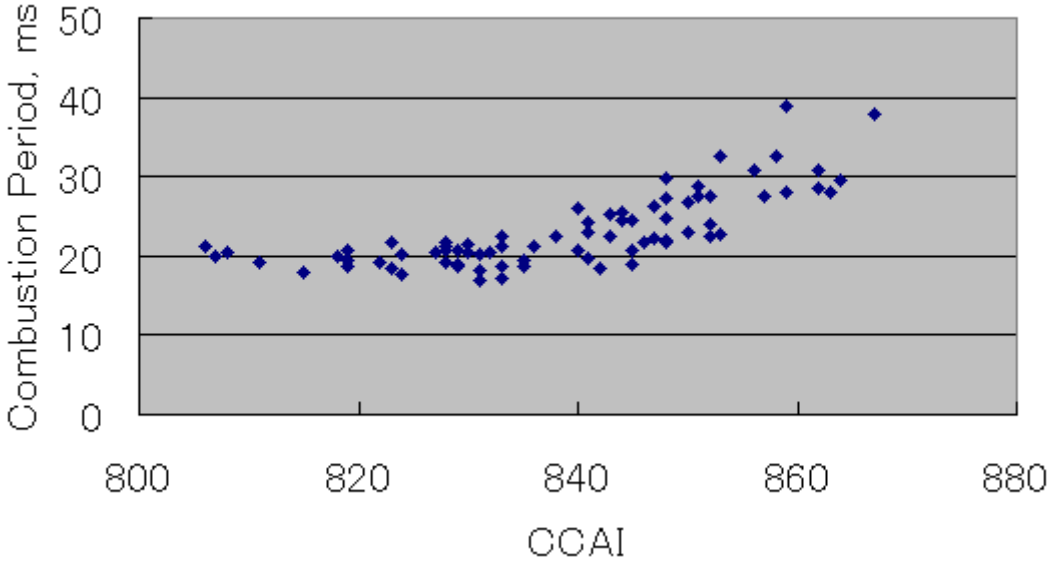

図 4　CCAI と燃焼時間の関係

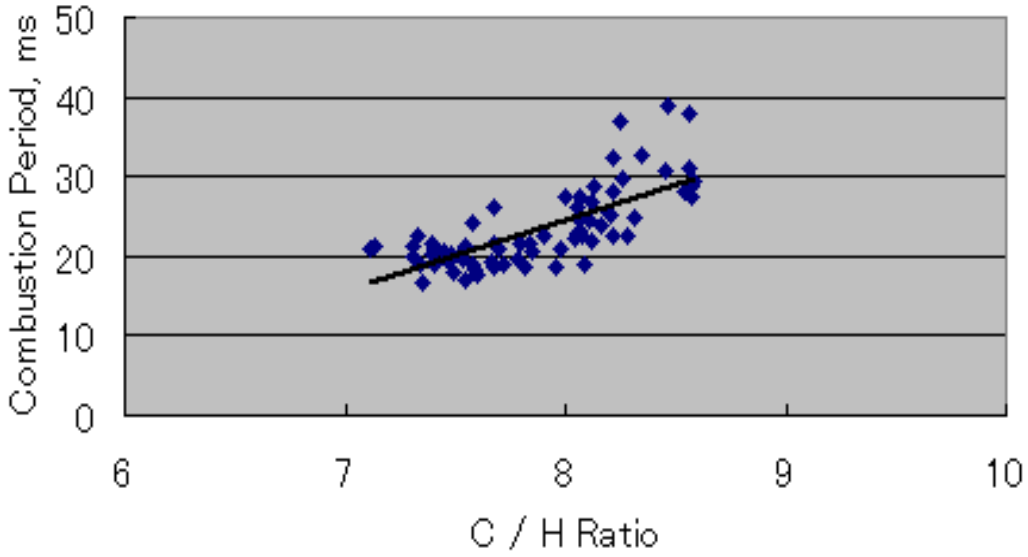

図 5　回帰線図の例、C／H比と燃焼時間の関係