

# 複合燃料のセタン価について (第1報)

田中義弘・浜崎和則・平 栄蔵\*・石神重男

(受理 昭和52年5月31日)

## ON THE CETANE NUMBER OF HYBRIDIZED FUELS (Report 1)

Yoshihiro TANAKA, Kazunori HAMASAKI, Eizo HIRA  
and Shigeo ISHIGAMI

The character of C. F. R-48 Diesel Engine was studied in detail, and then cetane number of 19 simple or hybridized fuels were measured. As the results the followings were obtained.

(1) The cetane number rating by the C. F. R Diesel Engine contains some questions. 1st of them is in the change of fuel injection character owing to the change of fuel properties, and 2nd is in the change of gas condition inside the cylinder owing to the change of compression ratio.

(2) It seems not preferable to rate the ignition character of fuel having far removed material properties by cetane number.

(3) Some fuels increase cetane number by hybridizing with other fuels, and some others are in contrast with this.

### 1. ま え が き

ディーゼル機関用燃料の重要な性質である発火性の表示としてセタン価が早くから提示されているが、今まで高セタン価に対する要求も、セタン価の許容限度までエンジン性能を向上する企図も目立ったものはなしに経過している。すなわち市販燃料のセタン価の表示も生産段階における直接的測定もほとんどなされず、50%溜出温度および比重を元に算出したいわゆる計算セタン価<sup>1)</sup>で事足りりとしてきている。しかるに現実には原油産地の多様化に基づく化学組成の多様化、比重のみで把握できない添加物、あるいは多数燃料の複合に基づく発火性の変化などあらためて直接発火性を実測する必要のあることが増加してきている。最近化石燃料の有限性の問題化にともないエネルギー有効利用の必要、あるいは省エネルギーの見地からディーゼル燃料の燃焼の研究<sup>2)3)4)5)6)7)8)</sup>がなされているが、直接発火性の評価をした研究は意外に少ない。

本研究はセタン価測定の標準機関である CFR 機関の基礎的特性を詳細検討してその発火性評価法としての問題点を明らかにするとともに、数種の燃料および

それらの複合物のセタン価を直接測定し、複合によって生ずるセタン価の変化について明らかにしたものである。

### 2. セタン価測定用ディーゼル機関

米国 WAUKESHA 社製 CFR-48 型ディーゼル機関を使用した。装置全体図を図1にしめす。

(1) 諸元。水冷単筒4サイクルディーゼル機関、筒径×行程：3.25×4.50吋 (82.55×114.30mm)。行程容積：37.33吋<sup>3</sup> (611.8cc)、冷却方式：蒸発水冷式、潤滑：強制式、燃料噴射ポンプおよびノズル：Bosch型、プランジャ径：5mm、圧縮比：7~28可変、副燃焼室：内径1.625吋 (41.28mm) 円筒形、室長可変範囲 0.35~2.750吋 (9.53~69.85mm)、連接棒中心間距離：10.00吋 (254.0mm)、弁開閉時期は図2にしめす。

(2) 附属装置。副燃焼室に MIT 電磁型指圧器 (図3) を取りつけた。これは誘起電圧を利用して圧力上昇率  $dp/dt$  を測定するものでその出力波形の一例を図4にしめす。図中の  $dp/dt$  極小値点、すなわち  $d^2p/dt^2$  が負から正に変わる点Aが燃焼開始点すなわち噴射後点火遅れ時間の終点をしめすものとした。

\*：工学研究科機械工学第二専攻

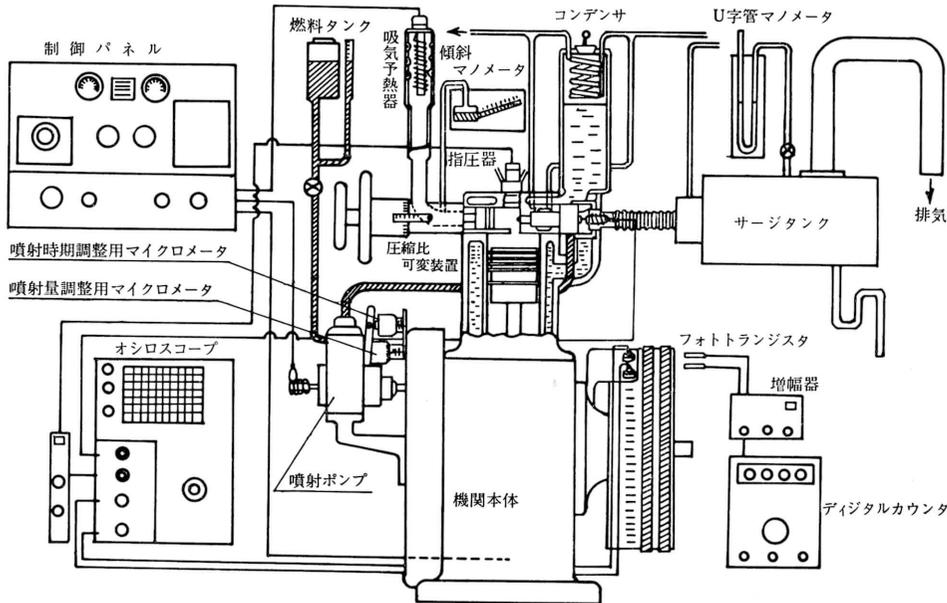


図1 実験装置図

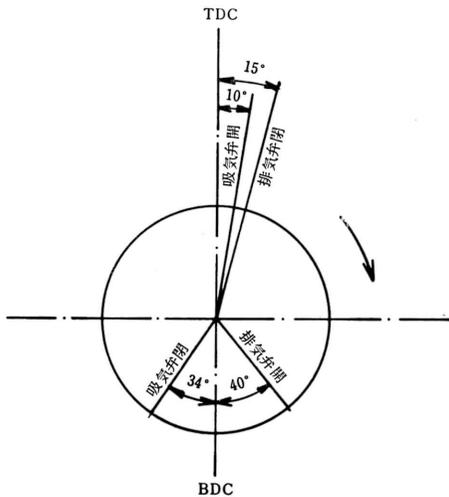


図2 弁開閉時期

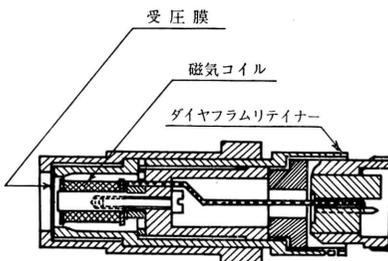


図3 MIT 電磁形指圧器

別にシリンダ内測定用として最高耐圧 100kg/cm<sup>2</sup> の抵抗線歪計式指圧器を使用した。燃料噴射ピントル弁の移動は図5のピックアップにより測定した。MIT電磁指圧計と同原理で弁の移動速度が測定される。その出力波形の一例を図6にしめす。

(3) 運転条件. ASTM セタン価測定条件 (1961) をそのまま使用した。すなわち回転数：900±9 rpm，噴射進角：13.0度，噴射圧力：1500±50 psi，噴射量：13.0±0.2 ml/分，噴射ポンプ設定：プランジャがカム基円から0.083±0.007時はなれたときポンプ胴の吸入孔が閉じる。噴射ピントル弁揚程：0.005±0.001吋，噴射弁冷却水套温度：100±5°F (38±3°C)，弁間隙：セタン価50燃料で運転中：0.008±0.001吋 (0.20±0.03mm)，潤滑油：SAE 30 (210°Fでセーボルト粘度58~70秒)，潤滑油圧：25~30 psi，油温：135±15°F (57±8°C)，冷却水温度：212±3°F (100±2°C)，吸入空気温度：150±1°F (66±1°C) である。

(4) セタン価測定法. 前記(3)の運転状態になったとき、圧縮比を高めながら MIT 指圧計の波形から発火点を TDC に、噴射ピントル弁の開閉時期を BTDC 13°に合わせる。そのときの圧縮比調整ハンドルの位置を読む。標準燃料による同様な運転時のハンドル読みと、某燃料による運転時のハンドル読みとからセタン価を算出する。

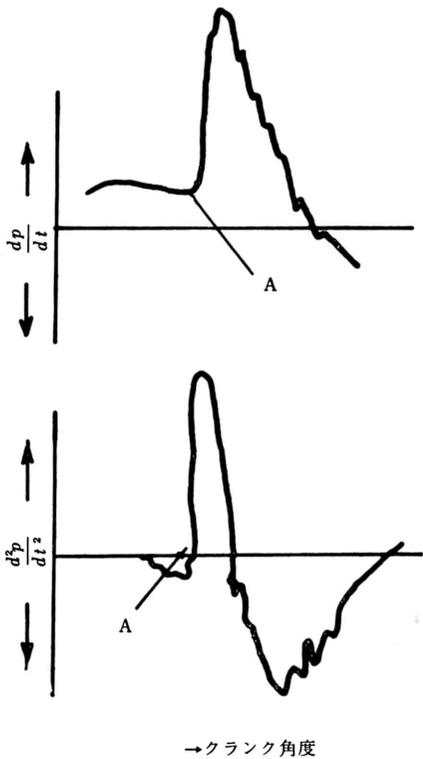
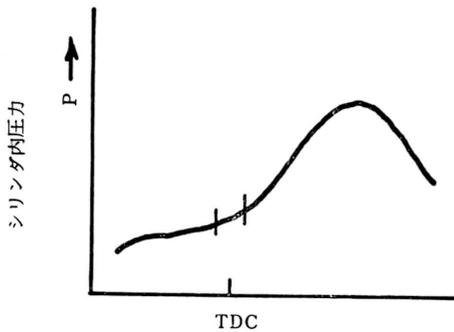


図4 MIT 指圧器出力波形

(5) 標準燃料. 正-セタンと $\alpha$ -メチルナフタリンを使用した.

(6) 測定した燃料. セタン価を測定した燃料を表1に, 各単一燃料の平均組成を表2にしめた.

### 3. 供試燃料の物性の検討

(1) 混合度. 灯油, 軽油, A重油, B重油相互の

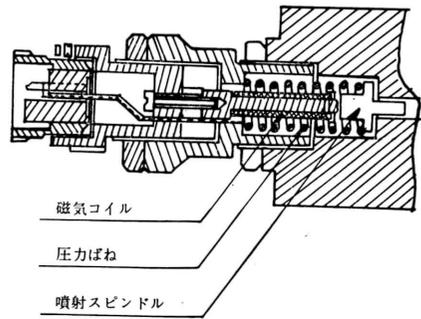


図5 噴射弁ピックアップ

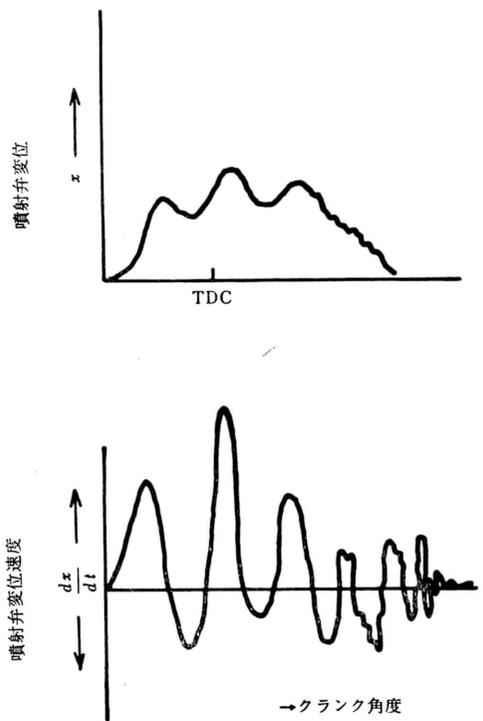


図6 ピントル弁移動出力図

混合は任意の割合いでほぼ完全で, 相当長時間を経ても各所の比重の差がなく一様である. エチルアルコールと灯油も任意の割合でよく混合するが, 軽油には5%程度, 重油には5%弱しか混合せず, 分離が早い. いわば粒状に混在している状態である.

(2) 空燃比および試験時空気過剰率について. 表2にしめた各燃料の平均成分を基に理論空燃比を求めた値を表3にしめた. 表に見るごとく重油系の燃料は空燃比は14.25~14.96すなわち14.00前後で大差

ないが、分子量の大きく異なるエチルアルコールや $\alpha$ -メチルナフタリンでは著しく異なった理論空燃比となる。

本研究に使用した CFR 機関によるセタン価測定法では常に吸気量一定、燃料噴射量一定であって、したがって燃料の理論空燃比の相異にともない燃料によっ

表 1 供試燃料

	供試燃料	比重
1	軽油	0.829
2	A重油	0.851
3	B重油	0.889
4	灯油	0.794
5	軽油(50%) + A重油(50%)	0.840
6	軽油(50%) + B重油(50%)	0.862
7	軽油(50%) + 灯油(50%)	0.812
8	A重油(50%) + B重油(50%)	0.871
9	A重油(50%) + 灯油(50%)	0.822
10	B重油(50%) + 灯油(50%)	0.842
11	B重油(67%) + 灯油(33%)	-
12	B重油(33%) + 灯油(67%)	-
13	軽油(95%) + エチルアルコール(5%)	-
14	軽油(90%) + エチルアルコール(10%)	-
15	A重油(95%) + エチルアルコール(5%)	-
16	B重油(95%) + エチルアルコール(5%)	-
17	灯油(95%) + エチルアルコール(5%)	-
18	灯油(90%) + エチルアルコール(10%)	-
19	灯油(80%) + エチルアルコール(20%)	-

表 2 各種燃料の平均組成

燃料	平均組成		
	C	H	O
ガソリン	0.856	0.144	-
灯油	0.860	0.140	-
軽油	0.865	0.135	-
A重油	0.875	0.125	-
B重油	0.880	0.120	-
n-ヘキサデカン	0.850	0.150	-
$\alpha$ -メチルナフタリン	0.930	0.070	-
エチルアルコール	0.522	0.130	0.348

表 3 各種燃料の空燃比, 空気過剰率

供試燃料	比重	空燃比 (kg/kg)	試験時の空気過剰率
エチルアルコール	0.797	8.95	2.75
n-ヘキサデカン(セタン)	0.772	14.96	1.71
$\alpha$ -メチルナフタリン	1.023	13.10	1.47
灯油	0.794	14.71	1.69
軽油	0.829	14.60	1.63
A重油	0.851	14.37	1.61
B重油	0.889	14.25	1.55
灯油(95%) + EA(5%)	0.794	14.43	1.72
灯油(90%) + EA(10%)	0.794	14.13	1.75
灯油(80%) + EA(20%)	0.795	13.56	1.83
軽油(95%) + EA(5%)	0.827	14.33	1.66
軽油(90%) + EA(10%)	0.829	14.06	1.69
A重油(95%) + EA(5%)	0.848	14.12	1.64
B重油(95%) + EA(5%)	0.884	14.01	1.59
標準燃料セタン価60	0.872	14.09	1.60
" セタン価55	0.889	13.99	1.58
" セタン価50	0.898	13.90	1.58
" セタン価45	0.910	13.81	1.57
" セタン価40	0.923	13.72	1.56
" セタン価35	0.935	13.64	1.54

注) EA: エチルアルコール

て試験時空気過剰率は著しく異なることが起こる。したがって燃料によっては極めて悪い燃焼条件で試験していることになる。セタン価測定のための標準燃料である $\alpha$ -メチルナフタリン自身も軽油等と大きく異なる分子量の単一物質であり、これを使用することにすでに問題を含んでいると見ることができる。よって CFR 機関によるセタン価が発火性の良否を評価することにはある限界があり、今後多様な燃料の発火性評価には別の評価法が開発されねばならないであろう。

#### 4. CFR 機関の特性について

(1) 燃料噴射系の特性。一般に比重、粘度、分子量などの異なる燃料またはその複合物を同一噴射系で噴射するばあい噴射率、噴射時期等に差異が生ずることが考えられる。これらについて以下の検討をした。

i) 圧縮比一定で噴射時期を変えたばあい。圧縮比

: 13.00, 回転数: 900rpm で発火運転し比較した。このさい噴射弁ばね圧力は  $105 \pm 3 \text{kg/cm}^2$  一定噴射時期は BTDC  $9^\circ \sim 20^\circ$  の間に変えた。このとき噴射時燃焼室内圧力の平均は  $18.9 \text{ata}$ , 変動幅は  $2.6 \text{kg/cm}^2$  であった。図7, 8, 9に噴射特性をしめす。図において縦軸は噴射時期調整器読 (Fuel Injection Micrometer Reading: FIMR), 横軸はニードル弁作動始めのクランク角 (Injection Timing Crank Angle: ITCA) である。

(a) FIMR と ITCA について。FIMR が大きいほど ITCA の進角は大きく, すなわち上死点より前にさかのぼる傾向にあり, 両者は直線関係をなし

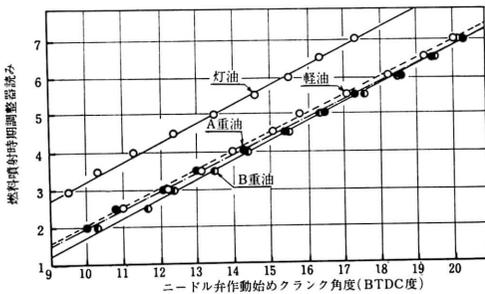


図7 噴射装置の特性 (圧縮比=13.00)

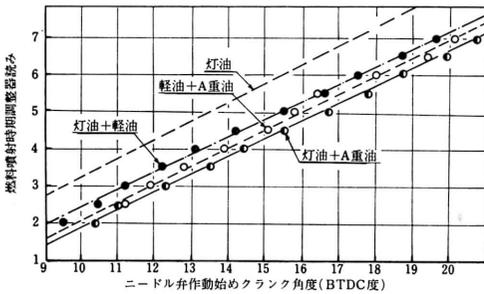


図8 噴射装置の特性 (圧縮比=13.00)

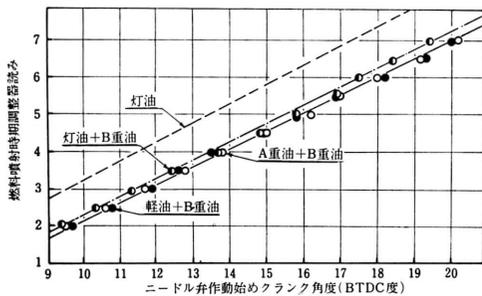


図9 噴射装置の特性 (圧縮比=13.00)

表 4  $C_1, C_2$  の値

燃料	定数	$C_1$	$C_2$	燃料	定数	$C_1$	$C_2$
灯油	油	2.75	0.510	灯油+A重油	1.40	0.475	
軽油	油	1.60	0.490	灯油+B重油	1.80	0.495	
A重油	油	1.55	0.475	軽油+A重油	1.55	0.490	
B重油	油	1.25	0.505	軽油+B重油	1.65	0.485	
軽油+灯油		2.00	0.470	A重油+B重油	1.65	0.485	

ている。FIMR を  $R$ , 噴射進角を  $\theta$  とすると

$$R = C_1 + C_2(\theta - 9)$$

の関係にあり,  $C_1, C_2$  の値を表4にしめす。図より軽油, 重油の線は密集しているが, 灯油は特に離れて存在する。複合した燃料では成分燃料の中間の性質になる組合せと, どちらかに片寄る組合せがあり, 灯油では大幅に複合した相手の性質に近づく。

(b) 比重との関係。図より各線の上下関係から一般的に各線の配列は比重と相関していると見ることができる。噴射時期すなわちニードル弁作動開始時期を一定, たとえば BTDC  $13^\circ$  とするとその時の FIMR は灯油=4.80, B重油=3.20で, 灯油ではこの差に相当するだけ燃料噴射ポンププランジャの作動を早くしなければならないことになる。つまり灯油のごとき軽質油では弁開圧力を得るため油圧を早くから加える必要があることになる。この原因としてプランジャ部における油の圧縮性などが考えられるが, 本装置では管路の短いことから考えて漏洩が原因と考えられる。比重との相関は比重と粘度との相関性という点からうなづけることであろう。

ii) 噴射時期一定で圧縮比を変えたばあい。噴射時期すなわちニードル弁作動時期を BTDC  $13^\circ$  一定としたときの噴射装置特性を図10, 11, 12にしめす。こ

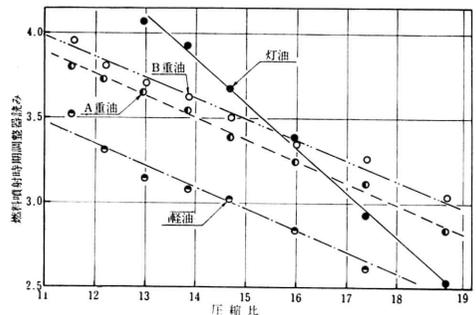


図10 噴射装置特性 (噴射時期一定)

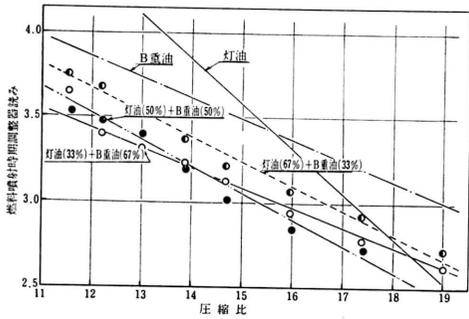


図11 噴射装置特性 (噴射時期一定)

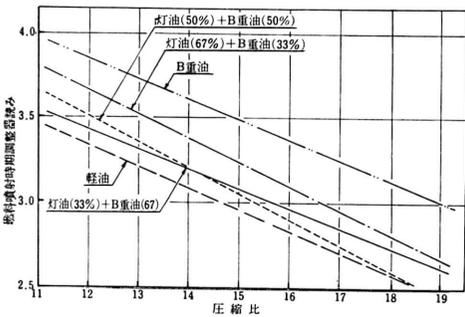


図12 噴射装置特性 (噴射時期一定)

のさい回転数=900rpm, ニードル弁ばね圧力=105±3kg/cm<sup>2</sup>. 圧縮比=11~19で, この間の燃焼室内平均圧力は 23.5ata, 最大変動幅は 5.6kg/cm<sup>2</sup> であった.

(a) 圧縮比と FIMR について. 一般的に圧縮比増加とともに FIMR は減少している. これは噴射開始時を BTDC 13° に確保するためにはプランジャ作

動開始時期を上死点に近づける必要のあることをしめしている. このことはシリンダ内空気圧と燃料油圧との和でニードル弁が開くと考えると, 圧縮比上昇とともに燃焼室内圧力  $P_c$  が上昇し噴射圧力  $P$  との差 ( $P-P_c$ ) は小さくてすむ. つまり弁開時期が早まることに基づくと考えられる. 図において灯油のばあい圧縮比増に対する FIMR 値の減少が目立つがこれは背圧に敏感なこと, すなわちプランジャ部漏洩が大きいためと考えられる. 漏洩に関係深い粘性が相対することを考え, 比重の変化に対する FIMR と圧縮比の関係を実験燃料によって求めたのが図13である. セタン価40, 45, 50と比重が小さくなるにつれ直線の傾きが大きくなっており, これは噴射遅れ特に漏洩が比重小なるものほど大きいことをしめしている. セタン価測定のさい圧縮比を変化させてゆくが, 噴射時期を BTDC 13° とするため圧縮比とともに FIMR を変化させなければならず, しかもその変化のさせ方が燃料により異なることは測定状態が相異なることを意味し, 発火性評価の問題点の一つであろう.

(b) 噴射開始後の状況. 噴射開始後の油圧を  $P$ , 噴射速度  $V_n$  とすれば  $V_n \propto \sqrt{P-P_c}$  と考えられ,  $P_c$  増とともに噴射時間が長びくと予想される. この点をたしかめるためニードル弁の変位速度  $dx/dt$  とクランク角を求めた. 一例を図14にしめす. 図は軽油についての結果で実線は圧縮比 11.59,  $P_c=16.82$  ata, 破線はそれぞれ 19.00, 28.03ata で, 噴射時期は共に BTDC 13° である. 高圧縮比の方が噴射初期の立ち上りは急であるが以後次第に位相が遅れ AT DC 10° でもまだ噴射している. かくのごとく同一燃

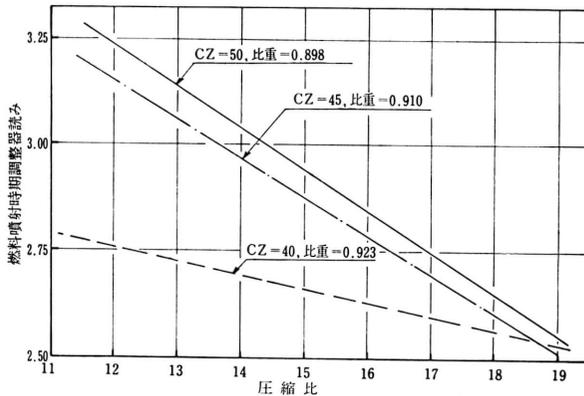


図13 比重射噴特性 (噴射時期一定)

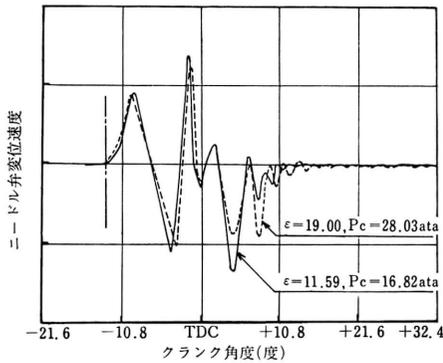


図14 ニードル弁変位速度（軽油）

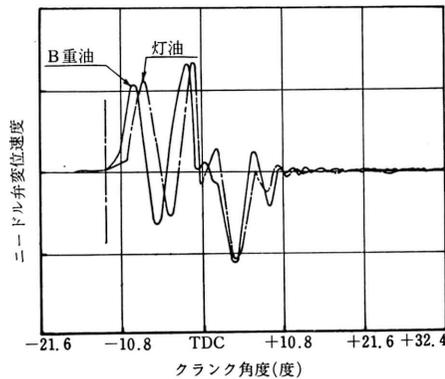


図15 ニードル弁変位速度（B重油，灯油）

料でも噴射の様相が異なる。図15は異なる燃料の噴射過程の一例で、圧縮比=12.8、回転数=900rpm、燃料消費量 13cc/min、噴射開始時期 BTDC 13°である。B重油は立ち上りは急であるが噴射持続時間は長い。灯油は立ち上りはゆるやかでしかも不安定で噴射持続時間はやや短い。立ち上りが急なことは初期噴射速度は早く微粒化は良く、初期噴射量は多く、早くから多くの燃料が高温ガスに接触し発火核は生成しやすく、しかも個数も多く発火しやすくなることが考えられる。各燃料により初期噴射の様相が異なり発火の難易を左右することもセタン価による発火性の測定法についての一問題点であろう。

iii) モータリング時ポリトロープ指数および燃焼温度。CFR 機関を 900rpm でモータリングした時の副燃焼室指圧線図の例が図16、機関吸入効率90%と仮定して算出した温度変化も併せ記入した。図17は指圧線図から逐次計算により求めたポリトロープ指数であ

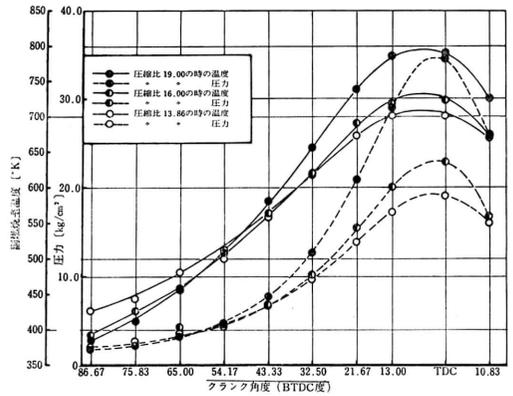


図16 副燃焼室内圧力，温度の変化

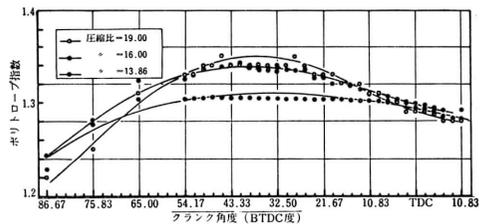


図17 ポリトロープ指数の変化

る。図から最高圧力点は上死点ではなくその少し前であり、最高温度点も BTDC 5°~8° で生じている。ポリトロープ指数の最高値は BTDC 35° 付近である。図中に圧縮比の異なる3つのばあいをしめしているが、最高圧力、温度共に当然異なっている。CFR 機関によるセタン価測定法では噴射時期、点火時期を一定にするため、圧縮比を変化するので燃料ごとに圧力、温度が異なることとなる。この点も実際機関での発火性の指標としてセタン価が適当であるか否か問題の一つであろう。

iv) 圧縮比一定で噴射時期を変えたときの複合燃料の燃焼。圧縮比一定のとき噴射時期の変化が発火遅れにおよぼす影響を複合燃料について再検討した。

運転条件は圧縮比=13.00、吸気温度=339°K、回転数=900rpm、燃料消費量=13cc/min.、噴射時期 BTDC 9°~21°、この間の燃焼室内圧力平均は 18.9 ata、平均室内空気温度は 710°K であった。上記条件で燃料噴射時期と発火遅れクランク角度との関係を求めた。図18は単純燃料、図19は軽質燃料、図20は重質燃料、図21は重質燃料と軽質燃料、図22は中間重質燃料、図23は軽油とA重油等の複合燃料である。図中の斜線は発火時のクランク角度をしめすもので、たとえ

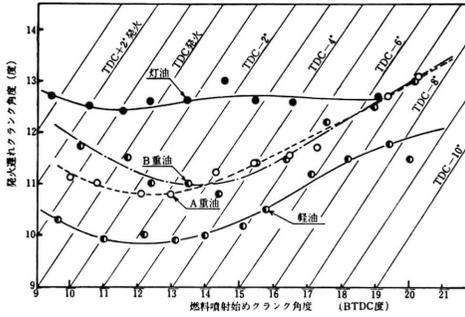


図18 燃料噴射時期をかえた場合の発火遅れ

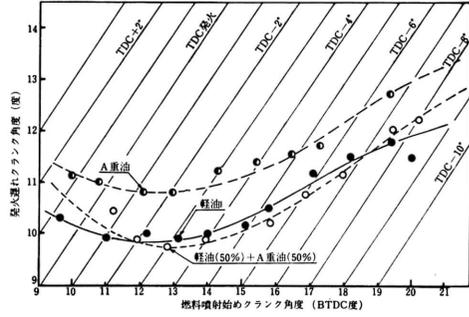


図22 噴射時期を変えた場合の発火遅れ

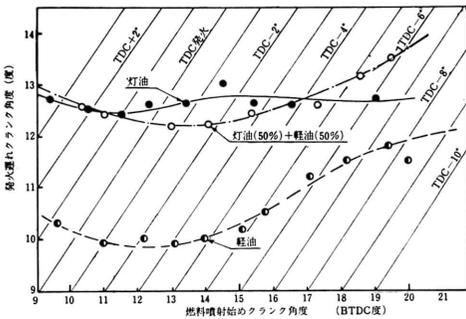


図19 噴射時期を変えた場合の発火遅れ

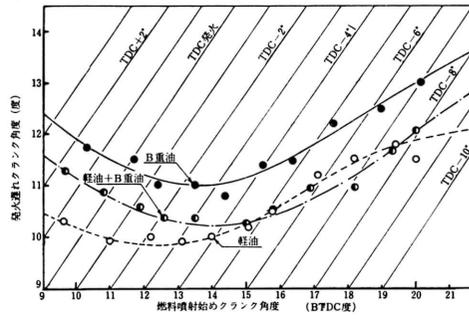


図23 噴射時期を変えた場合の発火遅れ

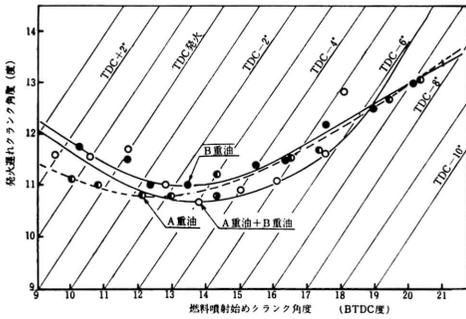


図20 噴射時期を変えた場合の発火遅れ

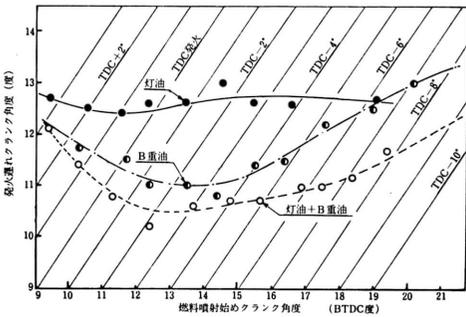


図21 噴射時期を変えた場合の発火遅れ

ば図18において BTDC 13° で噴射されたA重油の発火遅れは13°点の直上の発火遅れ曲線上に10.8°と読まれ、その時期はこの点を通る斜線に直角方向の読みから TDC-2.2°と読まれる。図から (a) 噴射時期が TDC 前から TDC に近よるにつれて発火遅れははじめ減少し、ある噴射時期で最少となり、後再び上昇する傾向がある。ただし灯油ではこの傾向は明らかでない。(b)セタン価が高いほど発火遅れは少ない。(c) 発火遅れ最少時期はセタン価の高い燃料ほど TDC 寄りに生ずるなどの傾向がわかる。また発火位置が BTDC 8° 以上になると明らかにノック音が観察された。本項にしめたことは噴射時期を変更しておりセタン価測定時の運転条件とは異なるが、セタン価測定時の圧縮比を変えて発火時期を TDC に合わせることに点火遅れ期間の調節作用が入りこみ、その遅れ期間は燃料によりまたは燃料複合により異質のものとなるわけで、セタン価による発火性の評価に一つの問題を与えているものと考えられる。

### 5. 複合燃料のセタン価

CFR 機関により ASTM 規定の測定条件のままの

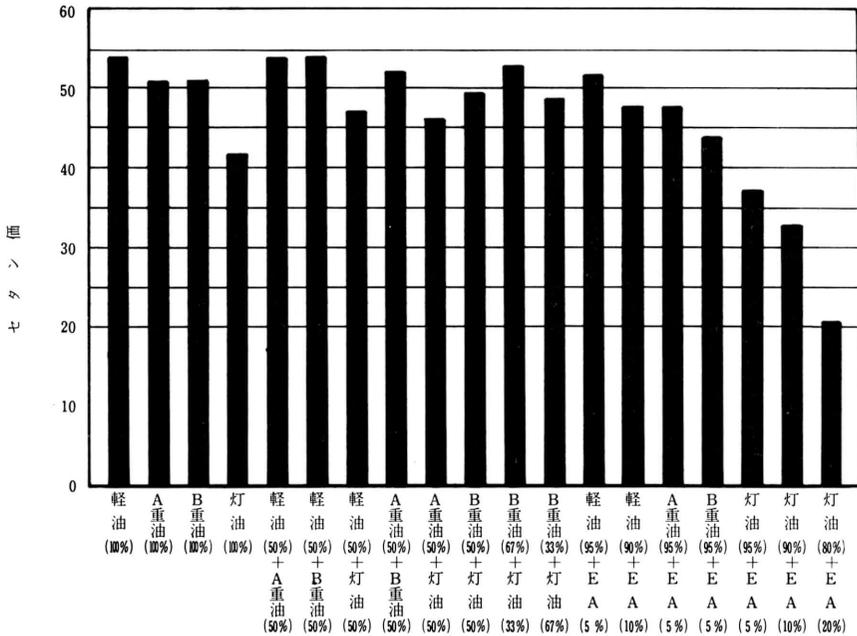


図24 複合燃料のセタン価

方法で表1の燃料のセタン価を測定した。結果を図24にしめす。

単独燃料のセタン価実測値は軽油54，A重油51，B重油51，灯油42であった。

複合燃料について (a) 表5にしめす5種類では元の燃料のセタン価と混合割合から算出したセタン価平均値より実測値が高く，混合により性能が改善された。(b) 軽油とB重油の複合では軽油の混合の影響はほとんどあらわれていない。(c) A重油と灯油の複合では両者の平均セタン価でいどであり，B重油と灯油の複合ではセタン価の高いB重油の値よりわずかに低くなる。(d) エチルアルコールを混合すると混合%に比例的にセタン価は低下する。(e) A重油，B重油は単独では同じセタン価であるが，これにエチ

ルアルコール5%を混合するとセタン価は低下するが，その低下量はA重油は少なく，B重油は著しい。概して軽油，A重油，B重油等は複合によってセタン価を向上する傾向があり，灯油，エチルアルコールは低下の傾向である。

以上のような複合によるセタン価の変化が発火核となりうる物質組成の変化のごとき化学的原因によるものであるか，または複合によって起こる粘度，比重，表面張力，あるいは燃料噴射特性等のごとき物理的原因によるものであるかは本試験法の結果では明らかにできない。

## 6. 結 論

CFR 機関の特性の検討および CFR 機関を使用し ASTM 規定により19の複合燃料のセタン価測定を行なった結果次の結論を得た。

1) 燃料の物性値が大きく異なる燃料の発火性をセタン価で評価するにはある限度があり，すべての液体燃料にわたって適用するには問題がある。

2) CFR 機関によるセタン価測定条件の中には燃料の特性の相異による燃料噴射系の特性の相異，噴射後の点火遅れに対するシリンダ内状況の影響の相異等多数の問題が含まれており，実際機関内の発火特性を

表 5 セタン価平均値と実測値

複 合 燃 料	セタン価平均値	セタン価実測値
軽油 (50%) + A重油 (50%)	52.25	53.70
軽油 (50%) + B重油 (50%)	52.56	54.02
A重油 (50%) + B重油 (50%)	50.73	52.04
B重油 (67%) + 灯油 (33%)	47.81	52.83
軽油 (95%) + E A (5%)	—	51.52

(注) EA：エチルアルコール

明らかにするには実際機関による運転によらざるを得ないと考えられる。

3) 燃料の種類によって複合によりセタン価を向上することもあり、あるものでは逆に低下する。

### あ と が き

終りに本研究にあたり実験に努力した岡江一成，西秀幸君ならびに補手東郷茂徳君に謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) 日本機械学会：機械工学便覧，(昭51)，12-10.
  - 2) 村山：日本機械学会論文集，34-263(昭43)，1274.
  - 3) 村山・宮本・深沢：日本機械学会論文集，36-285(昭45)，839.
  - 4) 高橋・笠井：日本機械学会論文集，35-271(昭44)，649.
  - 5) 平子・大田：日本機械学会論文集，36-281(昭45)，93.
  - 6) 平子・大田：日本機械学会論文集，39-319(昭48)，979.
  - 7) 平子・大田：日本機械学会論文集，39-322(昭48)，1949.
  - 8) 平子・大田：日本機械学会論文集，39-327(昭48)，3434.
-