高速ディーゼル機関における燃焼音と NO_xへのセタン指数の影響*

長谷川 勝男** 小田 健一**

Effects of Cetane Index on Combustion Sound and NO_x Emissions of a High Speed Diesel Engine

by Katsuo Hasegawa and Ken'ichi ODA

The increasing rate of engine sound and vibration is a grave problem on the coastal fishing boats. The acoustic characteristics of sound emission were studied with respect to the cetane Indices of fuel using a single cylinder diesel engine. At the same time, NO_x emission was evaluated to cetane index correlation. Consequently, levels of combustion sound and NO_x emission were increased appreciably at cetane Indexs below 45. These are due largely to the high rate of combustion pressure rise just when the violent pre-mixed combustion caused by long ignition delay occurred.

1. はじめに

漁船は、機関をはじめとして多数の振動・騒音源を有し、さらに船体外部からのプロペラや波浪による音も加わり複雑な騒音の環境におかれている。沿岸小型漁船では主機関の高速高出力化により騒音は増大する傾向にある。乗組員にとっては、居住区や労働の場所が主機関に近接せざるをえないことから騒音問題は深刻な状況にあり、労働環境の向上のためにその対策が課題である。

さらに機関の騒音増大要因として、燃料のA重油のセタン価（セタン指数）が今後低下することが懸念されている¹⁾。圧縮着火燃焼を行うディーゼル機関にとって、着火性の善し悪しの尺度であるセタン価は、燃料の重要な性状因子である。セタン価低下の影響は小型高速機関で特に大きくなることが予想される。

機関保守の省力化を目的として、音響手法による

異常診断システムに関する研究が盛んに行われている²⁾。正常か異常かを判別するためには燃焼音等から異常音を精度良く抽出する必要がある。そのためにも燃料性状に起因する燃焼音の特性を解明しておく必要がある。

すでに著者らは低セタン価燃料の機関始動性、燃焼特性、燃焼改善策について報告している^{3, 4)}。本報では直噴式ディーゼル機関を用いて燃料のセタン指数の低下による燃焼音への影響について調べることにする。一般に漁船に搭載される多気筒機関では騒音とその発生源との関係の解析は複雑となる。ここでは単気筒機関を用いて問題を単純化し、ディーゼル機関の騒音の発生過程および伝播過程を調べることも併せて目的とする。また、セタン指数とNO_x排出濃度との関係についても検討を加えた。

2. 供試燃料と実験方法

セタン指数が極端に低い分解軽油と一般の市販軽油を混合してセタン指数35から60の範囲で供試燃料油を作製した。表1に分解軽油と軽油の燃料性状を示す。分解軽油は芳香族分が多く密度が大きい。セ

*原稿受付 平成5年4月16日

平成4年秋季学術講演(平成4年11月11日)

**正会員 水産工学研究所(茨城県鹿島郡波崎町海老台)

タン指数は密度と50%留出温度等を用いて計算されるが、現行のJISではASTM D-976 (1966) に準拠した算出法を用いている。ASTMではその後より精度の高い算出式に改訂されている。ここではJIS K 2204のセタン指数計算式による値を採用することにする。比較のためにそれぞれの算出式から計算したセタン指数を表1中に示す。

供試機関の主要諸元を表2に示す。振動、騒音の計測装置の概略を図1に示す。筒内圧力の計測には歪ゲージ式の指圧変換器を用いた。振動計測には圧電式加速度ピックアップを用いて、ピストン運動方向(x方向)とシリンダライナの法線方向(y方向)の加速度を計測した。騒音計測用のマイクロフォンは機関から1mの位置とした。これらの信号は一旦データデコーダに記録した後、FFTアナライザおよびコンピュータを用いてデータ解析を行った。後述する筒内圧力および騒音の帯域フィルタ処理ではデータを再生する際に万能分析器(RION SA-33D)を用いて1/3オクターブバンドのフィルタリングを行った。排気ガスの測定にはNO_x分析計

(SHIMADZU NOA-305)、CO計 (SHIMADZU CGT-10) を用いた。

機関の運転条件として、回転数1800rpm一定のもとで実験を行った。負荷100%は定格出力時のP_{me}と等しくなるように動力計荷重を設定した。負荷100%の出力は5.1kWである。

3. 結果と考察

3.1 セタン指数と燃焼解析 セタン指数35から60まで5刻みで燃料を作製して機関回転数1800rpm一定のもとでセタン指数の影響を調べた。図2に燃焼状態とセタン指数の関係を示す。燃料のセタン指数の低下にともない着火遅れは大きくなるが、特に低負荷運転時にその傾向が顕著である。最高圧力(P_{max})はセタン指数が45以下になると中・高負荷時では増大している。低負荷時ではほぼフラットである。圧力上昇率の最大値(dP/dθ_{max})は負荷100%ではセタン指数の低下につれて急上昇

表1 供試燃料油の性状

項 目	分解軽油	市販軽油
密度 @15°C g/cm ³	0.931	0.836
引火点 °C	69	63
粘度 @30°C mm ² /s	3.21	4.16
10%残炭炭素 wt%	0.43	0.01
硫黄分 wt%	0.51	0.30
灰分 wt%	<0.01	<0.01
真発熱量 kJ/kg	41900	43200
CFPP °C	-17	-10
組成環分析 %		
C _P	33.0	61.0
C _N	14.2	16.5
C _A	52.8	22.5
分留性状 °C		
初留	168.5	182.5
10 %	238.0	227.0
50 %	273.5	292.0
90 %	321.5	352.5
セタン指数		
JIS K 2204(1991)	22.4	60.0
(ASTM D 976(1966)に準拠)		
ASTM D 976(1980)	27.4	56.7
ASTM D4737(1987)	25.2	61.4

表2 供試機関の主要諸元

機 関 型 式	単気筒横形水冷 4サイクルディーゼル
シリンダ径×行程(mm)	94×90
総排気量(cc)	624
圧縮比	18
定格出力(kW/rpm)	7.35/2600 (P _{me} =0.565MPa)
燃 焼 室 形 式	直接噴射方式
インジェクションポンプ形式	ボッシュK形ミニソフ
インジェクションノズル形式	ボッシュP形ホルノズノズル(4穴)
噴 射 圧 力 (MPa)	21.6
噴 射 時 期	TDC-22.5°

図1 振動・騒音計測装置

図2 燃焼状態とセタン指数の関係

している。これは予混合燃焼が爆発的になったためであり、この筒内圧力の急上昇に誘起されて騒音も大きくなっている。低セタン指数燃料の燃焼状態は吸気温度や機関温度に影響される。実験時の室温は10～15℃であり、計測は機関暖機後に行っている。

3.2 振動・騒音の時間波形 筒内圧力、加速度と騒音の時間的変化を図3に示す。筒内の圧力変化によって機関が加振され、その結果として音が放射される過程を示している。セタン指数60では無負荷時と全負荷時の振動、騒音波形の差はそれほど顕著ではない。負荷100%のセタン指数40では急激な圧力上昇に誘起されて振動、騒音ともに大きくなる様子がわかる。振動は短時間で減衰するが、騒音波形は比較的長時間にわたって振動が継続している。なお、騒音波形は機関からマイクロフォンまでの距離1mの伝達遅れを補正してプロットした。

3.3 筒内圧と騒音の周波数解析 前述したように燃焼騒音は燃焼による圧力急上昇を加振力として機関表面から放射される音である。従って燃焼騒音は筒内の圧力経過と密接に関係する。そこでFFTアナライザを用いて図3に示した筒内圧力と騒音波形の周波数解析を行った。図4は筒内圧の周波数特性を示し、図5は騒音の周波数特性である。いずれもセタン指数40と60を比較している。燃料のセタン指数の低下によって筒内圧、騒音ともに音圧レベルが高くなっている。特に500Hzから5kHzの周波数帯で明確に差がみられる。

一般に構造物が加振されると、加振力の周波数成分に応じて構造物固有のインピーダンスで振動応答し、外表面から固有の周波数スペクトルを持った音が放射される。機関での音の伝播伝達系においては、

図3 振動・騒音の時間波形

筒内の音圧はシリンダライナやクランクケースなどの機関構造体により減衰されて外部へ音が放射される。この減衰特性は、図4で示した筒内圧のスペクトルと図5で示した騒音のスペクトルの差で評価できる。条件の異なる3例の減衰特性を図6に示す。それぞれ1 kHz～3 kHz帯を底とするV字形の線図となる。この減衰特性は回転速度や負荷などによらず常に一定のもので機関固有の性質である^{5, 6)}。機関構造をフィルタとしてとらえると周波数1 kHz～3 kHz帯の音が最も通り易いことを示している。図4、図5で示したように筒内音、騒音がセタン指数の低下によって増大する周波数域は500 Hz～5 kHzであり、これは減衰特性が最低となる周波数帯と良く一致している。また、人の聴感度の高い周波数帯(300 Hz～6 kHz)とも一致することになる。

3.4 筒内圧と騒音の帯域フィルタ処理

筒内圧力波、騒音波を特定周波数帯だけを通過させるフィルタを通し、クランク角度に対するプロッ

トを行えば周波数別の音波の時間波形を得ることができる。このような限定された周波数帯の時間波形は音の発生・伝播メカニズムの理解の助けとなる。また音響手法を用いた機関の異常診断システムにおいても、特定の周波数帯を抽出して解析できるので検出感度を高めるのに有効な方法となる。

図7にセタン指数60の場合の4サイクル分のクランク角度に対する筒内音と騒音をそれぞれ帯域フィルタ処理した例を示す。図8はセタン指数40の場合の結果である。なお、帯域フィルタとして1/3オクターブバンドを設定した。図中に示す中心周波数はこの1/3オクターブバンドの中心の周波数である。

筒内圧力波を帯域フィルタ処理した線図より次のことがわかる。燃焼に伴って筒内では圧力振動が激しくなっている。中心周波数が1 kHz以上では燃焼開始点に漸近する減衰振動がみられる。上死点後のピストン下降に伴って、圧力振動は低周波数域に移行している。中心周波数200 Hzでは上死点后90度あ

図4 筒内圧の周波数特性

図5 騒音の周波数特性

図6 機関の構造減衰特性

たりで振幅が最大になっている。これらの傾向はセタン指数40でも同様であることがわかる。しかし、同一周波数の圧力振動の振幅を比較すると、セタン指数40の方が大きくなっていることから、セタン指数の低下によって筒内の圧力振動がより激しくなっている。

騒音波形では、各周波数成分とも燃焼行程で大きな振動がみられる。図中のALL PASSの波形はマイクロフォンに入る原音を示している。騒音波形はその発生源が多岐にわたるため筒内音に比べて複雑であるが、周波数が高くなるに従い最大振幅の位置は着火点に漸近してくる傾向がみられる。セタン指数60と40の線図を比較すると、セタン指数40の方が全周波数域で音の振動が大きくなっている。特に周波数2kHzと3.15kHzで顕著である。なお、騒音の波形は機関からマイクロフォンまでの距離1mの伝達遅れを補正して表示した。

図7と図8の比較から、セタン指数の低下によって騒音が大きくなるのは、燃焼音の寄与が大きいこ

とがわかる。

3.5 セタン指数とNO_x濃度 すでに述べてきたように、燃料のセタン指数の低下は予混合燃焼を活性化させる。それはサーマルNO_x生成を促進させる要因となる。ここでは排気ガス組成に対するセタン指数の影響について検討する。

図9にNO_x濃度、CO濃度とセタン指数の関係を示す。高負荷時にはセタン指数の低下にともないNO_x濃度は上昇している。一方、低負荷時ではセタン指数の低下につれてNO_x濃度は減少傾向にあるが、CO濃度は急激に増加している。次に燃焼波形からこれらの結果を考察する。

図10は負荷25%におけるセタン指数60、45、37の燃焼波形を比較したものである。同様に図11には負荷100%時の燃焼波形を示す。負荷25%ではセタン指数の低下によって着火遅れが大きくなっている。負荷100%時には着火時期はセタン指数によってそれほど大きくは変わらないが、熱発生率の最大値には顕著な差がみられる。

図7 筒内圧、騒音の周波数解析（負荷100%，セタン指数60）

図8 筒内圧，騒音の周波数解析（負荷100%，セタン指数40）

低負荷時では，セタン指数が低くなると上死点付近の圧力，筒内温度とも低く抑えられるためにサーマルNO_xの生成が抑制された反面，不完全燃焼生成物であるCOの排出が増加したものと考えられる。高負荷時では，セタン指数の低下にともなって圧力上昇が急激となり，ちょうど上死点付近で熱発生が最大となっているために，サーマルNO_xの生成が促進されたものと考えられる。これらの結果からNO_x生成条件として予混合燃焼の激しさ，即ち上死点直後の圧力，燃焼温度が大きな意味を持つことがわかる。

4. ま と め

以上のように燃料のセタン指数が必要以上に低下すると予混合燃焼が激しくなる結果，燃焼に伴う振動・騒音が増大するほか排気ガス組成にも大きな影響を与えることがわかった。

燃焼音の音響解析より，セタン指数低下による騒

音の増加は燃焼音の寄与が大きく，500Hzから5kHzの周波数領域で顕著であった。また，機関の構造減衰特性はセタン指数や負荷などの条件に無関係であった。

燃料のセタン指数の実用上のボーダーラインに関しては，気筒容積，圧縮比，機関回転数，燃焼室形式などの条件，さらに吸気温度とも関係し一概には決められないが，冬期でも機関の始動を保証できる値は最低限必要となる。また，リング・ライナの摩耗など耐久性面の検討も今後の課題となろう。

文 献

- 1) 花島：A重油のセタン価の動向，漁船機関，793（1992-11）～796（1993-2）
- 2) 例えば片木ほか：船用ディーゼル機関の診断技術に関する研究，舶機誌，21-6（1986-6），360
- 3) 小田ほか：小形ディーゼル機関による低セタン指数燃料の燃焼，舶機誌，24-6（1989-6），177

図9 セタン指数と排気ガスの関係

図10 低負荷運転時の燃焼波形

図11 高負荷運転時の燃焼波形

- 4) 長谷川ほか：小型機関における低セタン価燃料の燃焼特性，水工研研報，12（1991-3），61
- 5) 米澤ほか：ディーゼル機関における燃焼騒音予測手法，舶機誌，25-1（1990-1），5
- 6) 岡村：エンジン騒音とそのシミュレーション，舶機誌，25-9（1990-9），605

~~~~~ メッセージ ~~~~~

長谷川 勝男

本報では音の問題を中心に展開しました。騒音は不快な音ですので音圧の低減が焦点になります。しかし、音はたくさんの周波数成分から構成されており、情報の集まりであるとも考えられます。この貴重な情報をいかに有効利用するかが今後の課題となります。また、人の感性に合わせるように音を改質させる研究も必要と思います。