燃料噴射弁の開弁圧力低下による燃焼の変化とその原因解明

山 谷 尚 弘** 見 上 博*** 張 勁****
平 澤 良 男**** 石 原 外 美*** 手 崎 衆****

Mechanisms to Lower Fuel Injection Pressure after Extended Ship Diesel Engine Operations and Their Effect on the Combustion Behavior of an Engine

By Naohiro YAMATANI, Hiroshi MIKAMI, Jing ZHANG, Yoshio HIRASAWA,
Sotomi ISHIHARA, And Atsumu TEZAKI

Fuel injection pressure decreases in four-stroke diesel engines after extended operations. Poor combustion caused by the pressure drop is a serious problem that can lead to environmental pollution. Several factors have been considered to be behind mechanisms to decrease fuel injection pressure, but the details of such mechanisms are still unknown. Up until now, only limited numbers of studies have been conducted to define these mechanisms. In this study, we clarified that stress relaxation, buckling and metal fatigue of the pressure regulating spring in the fuel injection valve contribute to lowering injection pressure. We also found that the lowering of injection pressure causes early and prolonged injection in diesel engines.

1. 緒言

船用ディーゼル機関は陸用のディーゼル機関と比べてその運転時間が長く、一度の連続運転でも長期航海になると数十日におよぶ。このような長時間運転を行う船用ディーゼル機関において、機関の状態、特に燃焼の良否は非常に重要であり、燃焼が悪化すると環境に悪影響を及ぼすことになる。燃料噴射ポンプから燃料噴射弁に至る燃料噴射装置の経年変化は燃焼と直接関係し、噴射ノズルは船用ディーゼル機関で最も消耗の著しい部品である。この燃料噴射弁のノズルの開弁圧力（以下、開弁圧力と記す）は、数千時間の航海後、初期設定圧力より低下することが知られている。燃料噴射弁の抜出し開放整備はメーカーによって異なるが3000 から 4000 時間¹⁾を目安に整備が行われている。現場・ユーザーが把握している開弁圧力の低下は、異常を除き正常運転範囲内にある低下であり、これが1割程度であることは経験的に知られている。

開弁圧力が低下する理由は、調圧ばねの疲労による張力低下による設定圧力の変化（以下、張力低下と記す）、プランジャとバレル間の摩耗、ノズル孔の摩耗や閉塞による異常、高圧管系の異常などいくつか考えられる。これらの結果として生じる開弁圧力の低下は、噴射量の増加、噴射時期の早期化の原因となり、燃焼の過早着火²⁾、後燃え³⁾が発生する。これらの現象は筒内圧力の変化として計測される。

それに対して経年による圧力低下の現象は経験的に知られているが、この原因についてはまだ厳密に明らかにされているとは言えない。開弁圧力の検証も、現場・ユーザーの整備では手動式ノズルテストを用いた大気圧噴射方法しかなく、運転時の筒内噴射を再現しているわけではない。噴射状態を推測するに留まっているのが現状である。

著者らは前報⁴⁾で、開弁圧力の低下が過早着火など、燃焼へ大きな影響をもたらすことを報告した。ディーゼル機関では、限られた時間内で燃焼を完結させる必要があるため、完全燃焼させることは不可能であるが、出来るだけ、燃焼不良⁵⁾をともしない良好な燃焼を行わせる必要がある。現場・ユーザーでは、燃焼状態の良否を判断する指標として、排気温度、最高圧力、排気ガスの色相⁶⁾を用いている。排気温度が上昇すると燃焼不良⁷⁾と判断される。一般に燃料噴射弁の開弁圧力が低下すると噴霧状態が悪化して、環境を汚染す

*原稿受付 平成 28 年 3 月 24 日。

**正会員 富山高専専門学校 練習船 若潮丸
(富山県射水市海老江練合 1-2)。

*** 富山高専専門学校
(富山県射水市海老江練合 1-2)。

**** 富山大学 大学院 理工学研究部
(富山市五福 3190 番地)。

る可能性がある。また、各メーカー取扱説明書には、整備インターバルや圧力低下範囲、ノズルの使用時間などは記されているが、燃料噴射弁の経時変化については、ほとんど触れられていない。

本研究では、大型カーフェリー、並びに富山高等専門学校が所有する練習船に搭載された4ストロークディーゼル機関（以下、4ストローク機関と記す）に装備された燃料噴射弁を対象に、まず、開弁圧力の低下が排気温度、最高圧力、燃料噴射時期に及ぼす影響を明らかにした。次に、経年変化で生じる開弁圧力が低下する原因を明らかにした。

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置

実験には、日本海側を運航する大型カーフェリーに搭載されたC重油を燃料とする船用大型中速4ストローク機関（可変ピッチプロペラ、2機1軸、主機関）と富山高等専門学校が所有する練習船に搭載された軽油を燃料とする船用中型中速4ストローク機関（可変ピッチプロペラ、1機1軸、主機関）を用いた。表1にそれぞれの機関の主要目を示し、表2にそれぞれのエンジンに使用されている燃料油の性状を示す。

表1 供試機関の主要目

設置場所		実 船	練習船
型 式		12V46C	6M28BET
定格出力	kW	12,600	956
機関回転数	rpm	450	320
シリンダ径	mm	460	280
行 程	mm	560	480
使用燃料油		C重油	軽 油

表2 供試燃料油の性状

		C重油	軽 油
密度 (15℃)	g/cm ³	0.9722	0.8204
引 火 点	℃	102	63
流 動 点	℃	2.5	-12.5
動粘度 (50℃)	mm ² /s	163	2.923
硫黄分	mass %	2.86	0.0009
窒素分	mass %	0.22	0.22
残留炭素分	mass %	10.8	0
真発熱量	kJ/kg	40540	46000

2.2 実験方法

実験は、まず船用4ストローク機関の開弁圧力が経年使用により低下し、これが燃焼に及ぼす影響を明らかにするために、①開弁圧力低下による排気温度の変化、②開弁圧力低下による最高圧力の変化、③噴射時期の早期化を調査した。次に、開弁圧力が低下する原因を明らかにするために、④ノズル弁座とニードル着

座幅の減少、⑤調圧ばね圧縮変形量の不均一、⑥ばねガイド傷の表面粗さ増大を調査した。以下に、その詳細を示す。

2.2.1 開弁圧力測定と排気温度測定

開弁圧力は、手動式ノズルテスト（ZEXEL 製）を使用し、測定した。機関の排気温度は機関に装着されている熱電対を用いて測定した。供試機関は排気弁が1気筒に2本装着されているので左右の平均とした。

2.2.2 最高圧力の測定

最高圧力は、表1の供試機関（実船）に装備された電子指圧器（バルチラ製ハンディタイプ）を使用し、10ストロークの平均値を筒内圧力として測定した。

2.2.3 燃料噴射時期の測定

燃料噴射時期は、表1に示す練習船の主機関において、燃料噴射ポンプに取り付けられた高圧管と燃料噴射弁の位置を、燃料が大気中に噴射される状態にして、ターニング装置を使用して機関を回転させ、燃料の噴射始めを測定した。この時、開弁圧力を0.5MPaから2.5MPaまで0.5MPa毎に変化させた状態で、それぞれの開弁圧力における噴射時期をフライホイールの目盛から読み取り、10回の平均を計測値とした。

2.2.4 ノズル弁座とニードル着座幅の測定

調査方法は、ノズル本体をワイヤカットにて縦方向に切断、弁座部分を、簡易式デジタル顕微鏡を用いて倍率5倍で着座幅を測定した。

2.2.5 調圧ばね圧縮変形量の測定

調圧ばねの動きを高速度撮影することによって、ばね変形量を測定した。測定にあたっては、図1に示すように、フライス盤により燃料噴射弁の一部を削除して、ばね下部から順に10mm間隔毎に7箇所のばねの変形量を撮影した。高速度カメラの撮影条件は2000[fps]とした。

図2に測定装置の概要と測定方法を示す。

2.2.6 調圧ばねガイド表面の粗さ測定

調圧ばねガイド表面の粗さを測定するために、調圧ばねガイド部分を縦方向に切断し、表面粗さ計（株式会社ミットヨ製、型式SURFPAK-SV）を用いて表面粗さを測定した。

図1 フライス盤による燃料噴射弁の加工

図2 調圧ばね圧縮量の測定方法

3. 結果と考察

3.1 開弁圧力低下による排気温度の変化

表1に示す実船に搭載された、船用大型4ストローク中速ディーゼル機関を4000(±474)時間運転後、装着されていた燃料噴射弁全24本(2機分)を拔出し、開弁圧力を測定した。測定結果を図3に示す。図の縦軸は噴射圧力[MPa]、横軸は気筒番号[No.]である。図3からわかるように、使用後のすべての燃料噴射弁の開弁圧力は、使用前の開弁圧力(44.2[MPa])より、約10[%]低下している。

以上の結果から、燃料噴射弁は長期運転により開弁圧力が低下し、約4000時間の運転により1割程度低下することが明らかになった。

図3 経年使用による開弁圧力の変化量

次に、同4ストローク機関を約4000時間運転後の排気温度を測定した。縦軸に排気温度[°C]、横軸に気筒番号[No.]をとり整理した結果を図4に示す。同図中には、使用開始時の排気温度も併せて示してある。なお、図中上部の破線は約4000時間使用後の排気温度の平均値を示し、図中下部の破線は使用開始時の排気温度の平均値を示している。排気温度は特に負荷により変化が大きいことから、できる限り測定条件が同じになるよう、同一航路、同一負荷にて測定したものを比較した。測定時の気象、海象、運転状態を表3に示

す。図4からわかるように、使用後の排気温度は、使用前の排気温度と比較して、平均で16.4[°C]、約4.3[%]上昇しており、排気温度は上昇傾向となっていることがわかる。

図5に、実船における約4000時間運転後の、排気温度の増加率[%]と開弁圧力の減少率[%]の両者を比較したものを示す。横軸の数字は気筒番号[No.]を示し、図中上部の破線は排気温度の増加割合の平均値を示し、図中下部の破線は開弁圧力の減少割合の平均値を示している。図より、開弁圧力は全ての燃料噴射弁において低下、排気温度は、それに合わせて増加傾向にあるが、気筒番号7,9,16番では低下している。また、排気温度の上昇率が大きい気筒番号3,5,12,23番での開弁圧力の低下は、他気筒の結果と比べて大きくなっておらず、燃料噴射弁の個体差などの影響があるものと考えられる。なお、すべてのシリンダの排気温度は、メーカーが規定する上限値を超えるものはなく正常な範囲内にあった。

以上の結果から、排気温度の上昇⁸⁹⁾は開弁圧力の影響を少なからず受けていると推測されるが、開弁圧力が10[%]程度の小さな低下量では、排気温度を指標として、燃焼状態の良、不良の判断は難しいものと考えられる。

図4 整備前および整備後の排気温度分布

表3 気象海象および機関運転状態

	天候	風向	風力	ガバナ負荷
0時間	bc	9	2	6.4
4000時間	bc	5	3	6.3
	FOラック(mm)	ラック指示(%)	機関速度(min ⁻¹)	出力(kW)
0時間	41	75	454.1	9328
4000時間	40.5	72	454.1	9384

図5 排気温度の増加割合および開弁圧力の減少割合

3.2 開弁圧力低下による最高圧力の変化

先に述べたように、開弁圧力が低下すると噴霧の状態が悪化するため燃焼が変化して、最高圧力に影響を及ぼす可能性がある。この関係を明らかにするために、供試機関における開弁圧力と最高圧力を測定した。図6に整備後（使用開始直後）及び約4000時間運転後の最高圧力と開弁圧力の分布を示す。縦軸は最高圧力[MPa]並びに開弁圧力[MPa]、横軸は気筒番号[No.]を示している。図より、約4000時間運転後の燃料噴射弁では、全体的に開弁圧力が低下するとともに、最高圧力は運転前のそれと比較して、約4.7[%]程度低下している。

図6 整備前及び整備後の最高圧力と開弁圧力分布

3.3 開弁圧力の低下による噴射時期の早期化

4 ストローク機関の噴射開始時期は燃料噴射弁の開弁時期ではなく、燃料ポンプの突き上げ開始時期の調整によってなされ、噴射期間は燃料ハンドルに連結したプランジャの回転による有効行程の増減により決まる。噴射時期の測定方法として、燃料ポンプ突き始めを噴射とするが実際の開弁時期ではない。燃料噴射弁

までの高圧ラインに圧力センサーを取り付けることによって、正確な開弁時期を測定できる。しかし、使用中の供試機関を加工することによって機関に悪影響を与え、船の運航に支障をもたらすことが危惧される。そこで、簡易的な方法ではあるが、開弁時期の測定を表1に示す練習船の主機関で行った。図7は、縦軸に開弁圧力[MPa]、横軸にクランク角度[°]をとり、各圧力における開弁時期を示したものである。

図7 燃料噴射弁の開弁圧力と時期の関係

図より、開弁圧力が低下するとクランク角度が上死点(TDC)からマイナス方向へ移動することがわかる。以上の観察結果より、開弁圧力が低下すると、開弁時期が早まることによって燃料の噴射開始時期が早くなることがわかった。

3.4 ノズル弁座におけるニードル着座幅の減少

図8に燃料噴射弁の構造¹⁰⁾を示す。図よりわかるように、先端に取り付けられた噴射ノズルは、ノズル本体に設けられるスリーブの中にニードルがはまり、その先端が円錐面に仕上げられた弁座の上に乗る、上から調圧ばねで押さえられる構造となっている。燃料圧がニードルの下面に作用し、調圧ばねで押さえられている力に打ち勝つことで開弁する。これによって噴射が始まり、燃料圧が下がり調圧ばねの力が強くなると弁は自動で閉まる。この動きの中で燃料圧を保持するために重要な役割を果たす部分は弁座である。

開弁圧力は、燃料噴射弁上部のばね押さえを締め込みにより調圧ばねの初期圧縮力により調圧される。初期の開弁圧力に設定された後、ばね押さえには緩み止めが行われる。そのため、機関運転中に、ばね押さえとばね受けの距離は変わらない。

開弁圧力の低下する過程を調査するために、まず、ニードルと弁座の当たりとなる着座状態を調べた。ノズル(24本分)は表1に示す実船に取り付けられていたものである。図9は、高い開弁圧力40.7[MPa]と低い開弁圧力38.7[MPa]における、弁座の状態を示した

ものある。図中には、弁座下部（弁座における燃料流出側）における着座幅の減少分を示している。図より、開弁圧力が40.7[MPa]から38.7[MPa]へと低下することによって、当たりとなる着座幅は、減少していることがわかる。なお、運転前の新品ノズルでは全面あたりであり、着座幅の減少分は0[%]となる。

図8 燃料噴射弁の構造

耗する可能性がある。特に弁座の上部が摩耗すると、燃料油の圧力がニードルに作用する面積が増加して、これによって生じる上向きの力が大きくなるため、調圧ばねの圧力を一定とするとより低い圧力で噴射が始まることになる。これと調査結果もよく対応する。今後、この関係を明確にする必要があると考えられる。

図10 開弁圧力と弁座着座幅減少量の関係

図9 ノズルの着座幅変化と噴射圧力の関係

着座幅減少量[%]を測定し、開弁圧力[MPa]との関係で整理した結果を図10に示す。図10より、41.2[MPa]という高い開弁圧力では、着座幅の減少分は約10[%]と少ない。一方、38[MPa]前後の低い開弁圧力では、着座幅の減少分は約23[%]と多く減少している。従って、開弁圧力の低下と、着座幅の減少には相関があることが明確になった。

燃料噴射弁の開弁圧力低下に対する対応については、統一された考え方は存在せず、製造メーカーによって異なった見解がある。供試燃料噴射弁の製造メーカーであるA社は、設定後の開弁圧力の低下に対して、噴射状態（後垂れ、圧力降下時間）の悪化を除き、再調整をおこなわない。再調整をした場合、締めすぎにより、ノズル内、ニードルが下方に移動し作動不良を起こす可能性があるとしている。表1に示す、実船における燃料噴射弁の開弁圧力は、44.2[MPa]と非常に高いため、燃料が噴射される毎にニードルと弁座間に高速の流れが生じる。これが繰り返されるとノズル孔の摩耗や弁座の上部（弁座における燃料流入側）と下部が摩

3.5 調圧ばね圧縮変形量の不均一

表1に示す練習船に搭載された主機関に装着されている噴射弁のばねガイドをフライスにて除去加工し、調圧ばねの一部を露出させることによって、調圧ばねの圧縮変形量を測定した。

加工により調圧ばねを露出させた箇所長さは約0.3d（d：ばね外径）である。調圧ばねの変形に加工による影響が生じないように、調圧ばねの露出箇所長さは最小限とした。燃料として軽油を用い、噴射圧力は供試機関の初期設定圧力である34.3[MPa]とした。

図11は、調圧ばねの各位置におけるばねの圧縮量を示したものである。縦軸には調圧ばねの圧縮量[mm]、横軸には調圧ばねの長さ[mm]をとり整理したものである。ばね下部から5[mm]から65[mm]の範囲で、10[mm]間隔7箇所の変形量を撮影、測定した。

図11からわかるようにばね下部から5[mm]から15[mm]の範囲でニードルからの突き上げによって0.1[mm]から0.35[mm]の大きなばねの圧縮変形が生じている。しかし、25[mm]から55[mm]の範囲では、圧縮変形は0.05[mm]一定であった。この区間では、ばねが左右に振れる、いわゆる座屈現象が認められた。また、ばね下部から65[mm]から70[mm]の範囲では、ばねの圧縮変形は生じない。以上の実験観察よりばね下部でニードルからの入力エネルギーの殆どがばねの圧縮変形により吸収され、ばねの中間部分で座屈が発生し、ばねの上部には、圧縮エネルギーが伝達されないものと考えられる。

製造メーカーであるB社は、調圧ばねに対して、長さが新品時より1[mm]短くなれば使用を不可としてい

る。これは、長期使用により調圧ばねは、材料劣化によって、ばねに応力弛緩現象が生じることを前提とし、消耗品として扱う考え方と推察する。これについては、実験結果とよく対応する。また、調圧ばねの折損事故がばね下部、すなわち、ばねの巻き始めに多く現れるという現場・ユーザーからの報告ともよく対応する。

以上の結果から、ばねの圧縮変形が繰り返されることによって座屈、金属疲労などの現象が生じ、ばねが劣化し、複合効果によって、調圧ばねの張力が初期設定値より低下するものと考えられる。

図11 調圧ばねの圧縮量分布

3.6 ばねガイド傷の表面粗さ増大

燃料噴射弁の内部には、スリーブ状のばねガイド部がある。表1に示す練習船に搭載された主機関の燃料噴射弁に装着されているばねガイドのクリアランスは、ばね外径 12[mm]、ガイド内径 12.5[mm]なので、直径で0.5[mm]の空障が設けられている。ガイド部には、調圧ばねとガイド部が接触して生じた接触痕があった。これは調圧ばねの座屈によって生じたものと思われる。接触痕の表面粗さを表面粗さ計によって測定した。図12に、調圧ばねの各位置における表面粗さの変化を示す。表4は測定条件を示している。

図12 ばねガイド部の表面粗さ

表4 表面粗さ測定条件

測定条件	測定長さ(mm)	レンジ	速度(mm/s)
	85	オート	0.5
R面自動測定	オーバレンジ	ピッチ(μm)	測定点数
Off	中断	1	85000

波形が下方に振れるほど、摩耗量が大きいことを表している。図12より、調圧ばね下部のばねが圧縮変形した箇所では、ばねガイド部の摩耗が少ない。調圧ばね中間部の大きく座屈変形が生じた箇所では、表面粗さの波形が下方にシフトしていることから、摩耗量が多いことがわかる。ばねの中間部からばね上部にかけて、表面粗さの波形（摩耗量）に変化があることから、ばねがS字状に座屈したことを示唆している。

4. 結論

本研究では、燃料噴射弁の開弁圧力低下による燃焼の変化とその原因を解明するために、実船に搭載された燃料噴射弁を対象に、開弁圧力の低下が排気温度、最高圧力、燃料噴射時期に及ぼす影響とその原因を明らかにした。その結果、本実験範囲において次の結論を得た。

1. 燃料噴射弁の開弁圧力は、長時間運転により低下し、約4000時間の運転により1割程度低下する。
2. 排気温度は、開弁圧力の影響を少なからず受けていると推測されるが、開弁圧力が10[%]程度の小さな低下量では、排気温度を指標として、燃焼状態の良、不良の判断は難しい。
3. 最高圧力は、長時間運転による開弁圧力の低下と共に低下し、約4000時間の運転により、運転前のそれと比較して、約4.7[%]程度低下する。
4. 開弁圧力が低下すると、開弁時期が早まることによって燃料噴射の開始時期が早くなる。
5. 弁座の上部が摩耗すると、燃料油の圧力がニードルに作用する面積が増加して、これによって生じる上向きの力が大きくなるため、調圧ばねの圧力を一定とするとより低い圧力で噴射が始まる。
6. ばねの圧縮変形が繰り返されることによって座屈、金属疲労などの現象が生じ、ばねが劣化し、複合効果によって、調圧ばねの張力が初期設定値より低下する。
7. ばねガイドの接触痕の観察より、燃料噴射弁の開弁時、ばねの中間部分で座屈が発生することがわかった。ニードルからの入力エネルギーの殆どが調圧ばね下部の圧縮変形により吸収され、ばねの上部には、圧縮エネルギーが伝達されないものと考えられる。このように、調圧ばねの下部に変形が

集中することにより、ばねの劣化が早まり、調圧ばねの張力低下を促進したものと考えられる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり貴重な助言を頂いた富山高等専門学校 海木幸登氏、保前友高氏、篠島司郎氏、山本桂一郎氏、実験に協力して頂いた新日本海フェリー株式会社 伊藤公一氏、稲田幸基氏、川崎汽船株式会社 佐川翔梧氏、日本通運株式会社 瀬戸実嘉氏、国土交通省 上波純一氏、貴重なデータを頂いた新日本海フェリー株式会社海上職員の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Niigata Engineering Co.,Ltd.,Instruction Manual, (1995), 7-7.
- 2) Shizune HASEGAWA, Marine diesel textbook, (1988), 110, SEIZANDO-SHOTEN PUBLISHING Co.,Ltd.
- 3) Takeshi IMAHASHI, and Toshihiko OKINO, In fact the basis of the marine diesel engine, (2008), 117, KAIBUNDO Co.,Ltd.
- 4) Naohiro YAMATANI, Kouichi ITO, Hiroshi MIKAMI, Atsumu TEZAKI, The changes in fuel injection pressures and fuel spray quantity of marine diesel engines, The Society for Mathematical Sciences 34th Proceedings, (2015), A302.
- 5) Noboru NAKAI, Marine engine management system management, (2010), 76-77, SEIZANDO-SHOTEN PUBLISHING Co.,Ltd.
- 6) Yoshiro KAWASE, Marine engines Introduction, (1974), 29, KAIBUNDO Co.,Ltd.
- 7) Shizune HASEGAWA, Marine diesel textbook, (1988), 119, SEIZANDO-SHOTEN PUBLISHING Co.,Ltd.
- 8) Yasutaka KITAMURA, Study on low emissions of the direct-injection diesel engine with a mixed control, (2007), 87.
- 9) Shizune HASEGAWA, Marine diesel textbook, (1988), 120, SEIZANDO-SHOTEN PUBLISHING Co.,Ltd.
- 10) Fujio NAGAO, Internal combustion engine lecture, (1996), 248, YOKENDO Co.,Ltd.