

燃料噴射弁の不具合がディーゼル主機関の運転に及ぼす影響に関する実験的研究

株式会社 MTI ◎小知井 秀馬 大石 智生 日本郵船株式会社 井上 伸一
東京海洋大学 塚本 達郎 佐々木 秀次 大橋 慶勤
一般財団法人 日本海事協会 若生 拓也

1. 緒 言

ディーゼル主機関における燃料噴射弁の不具合は主機関の燃焼状態を悪化させ、燃費増加や出力低下など環境面と安全面の両方で大きな影響を及ぼす¹⁾。燃料噴射弁の噴霧状態は単体での噴射テストにより確認することが可能であるが、不具合が発生した際の噴霧悪化が実際に主機性能にどのような影響を与えるか詳細に分析している例は少ない。そこで本研究では、燃料噴射弁の故障モードについて、いくつかの不具合項目について意図的に反映した燃料噴射弁を用意し、これらを搭載したテストエンジンでの燃焼試験を通じて、エンジンの運用状況に及ぼす影響や故障監視の方針について考察した。

2. 故障モード解析

燃料噴射弁の主要故障および分析対象の洗い出しのため、FTA (Fault Tree Analysis) による故障モードの洗い出し及び故障に至る要因分析を実施した。上記分析を踏まえ、本研究では噴孔拡大、シート不良（ベタ当たり、圧痕、粗度低下）、針弁の摩耗によるクリアランス拡大、およびメンテナンス不良として燃料噴射開弁圧の低下を故障モードとして挙げた。後述する燃焼試験では、これら故障により引き起こされると想定される排気温度や筒内圧、噴霧状況（燃料噴射圧）を分析し故障影響を調査している。

3. 燃焼試験

燃焼試験は陸上に設置された試験用のディーゼル主機関 3UEC33LSII-Eco を用いて実施した。本主機

表 1 試験ケース一覧

Case	異常内容	変更代
1	正常時（健全状態）	なし
2	噴孔拡大	噴孔径+15%拡大
3	噴孔拡大	噴孔径+30%拡大
4	摺動部クリアランス拡大	クリアランスを製造時の3倍
5	噴射開弁圧低下	開弁圧を設定値 -3 MPa
6	噴射開弁圧低下	開弁圧を設定値 -6 MPa



図 1 意図的に異常を発生させた噴孔拡大ノズル

関では各種状態量を計測可能なことに加え、筒内圧センサおよび FO 供給圧センサによるデータ計測が可能である。実施ケースは表 1 に示すように健全状態を含めた計 6 ケースとしている。なお、故障モード解析で挙げていたシート不良については試験装置の都合から実施していない。また、故障の再現としては、各シリンダにそれぞれ二つずつ設置される燃料噴射弁のうち No.1 シリンダの Aft 側の一つについて、意図的に異常を発生させた噴射ノズルを取り付け 25/50/75% 負荷での試験運転を実施した。図 1 には噴孔拡大を意図的に発生させたノズルを示す。

燃焼試験の結果として表 2 に主要パラメータの解析および比較表を示す。なお、表 2 では一般項目として排気温度の他、燃焼状態の把握として筒内圧から算出した燃焼質量割合 MFB (: Mass Fraction Burned) および Pmax を、噴霧状態の把握として燃料噴射圧から算出した噴射期間と噴射開始及び最大噴射圧力

表 2 燃焼試験の解析結果

Case No.	Power	MFB0.2 angle (deg)	Ignition Delay (deg)	Pmax (MPa)	Burn Duration (deg)	Injection Start Angle (deg)	Injection Start Pressure (MPa)	Injection Max Angle (deg)	Injection Max Pressure (MPa)	Injection Duration (deg)	Exhaust Temp. (K)
Case1	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Case2	25	-0.01	0.12	-0.03	-0.08	-0.27	-1.47	-0.34	-2.03	-0.04	20.00
Case3	25	0.10	0.14	0.12	0.09	-0.10	-1.50	-0.20	-5.12	-0.14	29.20
Case4	25	-0.07	-0.04	-0.13	0.05	-0.43	-3.23	-0.31	1.76	0.27	-2.40
Case5	25	-0.61	0.07	0.33	-0.18	-0.63	-1.26	-0.63	2.09	0.13	10.80
Case6	25	-1.07	0.17	0.46	-0.96	-1.33	-8.72	-0.96	3.73	0.84	8.10
Case1	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Case2	50	0.15	0.02	0.24	-0.37	-0.01	0.26	0.06	-0.76	-0.25	29.10
Case3	50	0.29	0.15	0.13	-0.05	0.09	0.15	0.65	-2.21	-0.69	38.60
Case4	50	0.02	-0.18	0.09	-0.31	-0.02	-0.55	-0.07	0.32	-0.21	-5.10
Case5	50	-0.94	0.02	0.49	0.33	-0.75	-0.06	-0.30	0.25	0.25	9.30
Case6	50	-1.01	0.05	0.39	0.80	-0.74	-1.16	0.22	0.12	0.17	11.70
Case1	75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Case2	75	-0.55	0.04	0.30	-0.85	-0.49	-0.01	-0.88	-0.10	-0.53	26.20
Case3	75	-0.60	0.47	0.11	-0.44	-0.46	-1.21	-0.65	-0.94	-1.11	47.80
Case4	75	0.32	-0.25	0.11	-0.32	-0.01	-1.54	-0.01	0.26	0.07	-2.40
Case5	75	-0.59	0.09	0.84	-0.11	-0.67	-1.29	-0.61	0.09	0.15	-8.50
Case6	75	-1.16	0.57	0.54	0.05	-0.59	-2.20	-0.49	-0.27	0.20	-4.00

時のタイミングおよび圧力をそれぞれ記載している。また、異常発生時のパラメータ変化を明確化させるため、正常時 (Case1) に対する異常時 (CaseX) の増減値を算出して記載しており、表 2 において正/負の値となっている場合には、異常時で増加/減少するパラメータである。

はじめに、噴孔拡大 (Case2,3) に着目すると、いずれの場合も排ガス温度の上昇や着火遅れの様子がみられる。これは、燃料噴射圧の最大値や噴射時間の減少傾向からわかる様に、ノズルの噴孔拡大により圧力が十分でない状態で急速に燃料が噴霧されることによる着火性の悪化に起因すると考察できる。

次に、クリアランス拡大 (Case4) について考察する。表 2 からわかる様に Case4 のみ特筆して変化が見られるパラメータは少なく、燃焼状態や噴霧において影響が少ない状況が確認できる。なお、Case4 の場合、燃料噴射弁からの漏油について異常がある Aft 側では漏油が通常の約 6 倍発生したことが確認された。これらのことから、今回考察した諸パラメータでは本故障を見つけることは難しいが、従来通りの目視観測といったメンテナンスにより発見が可能であると考えられる。

最後に、噴射開弁圧低下 (Case5,6) について考察する。まず特徴的なパラメータは噴射開始タイミングの進角と噴射圧力の減少である。これは、故障要因である噴射設定圧力の低下が、そのまま表れている結果である。また、設定値の減少に伴い閉弁時の圧力も下回る (遅角するため) 結果的に噴射期間としても、他 Case と比較して延びていることが確認で

きる。また、噴射タイミングの早期化により燃焼関係として MFB0.2 は進角している様子が見えるが、着火タイミングは遅くなっており噴霧の悪化を示唆している。Case5,6 では排気温度の変化が少ないが、このように噴霧や燃焼の様子を考察することで見てくる故障があることもわかった。

4. 結 言

本研究では、ディーゼル主機関における燃料噴射弁の不具合に対するエンジンの運用状況に及ぼす影響について調査した。具体的には、FTA 解析を通じて得た各故障モードについて、意図的に異常を発生させた燃料噴射弁を搭載し燃焼試験を行うことで、各種運転パラメータに現れる変化を考察した。結果として、筒内圧や燃料噴射圧の監視は一般監視項目だけでは検知できない燃焼や噴霧の悪化を分析することが可能であり、故障プロセスの解明に有効であることがわかった。しかしながら、上述した様にこれらパラメータ単体で個別の故障原因を診断するには課題が残されている。そのため、従来通りの計測項目監視や目視検査も含め様々な側面を組み合わせることが肝要であると言える。

参考文献

- 1) 山谷ら, 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, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 53 巻 第 1 号, pp.140-146, 2018.