触覚による船用ディーゼル機関燃料 系統の異常診断—第2報—*

黄 允 千** ・ 中 哲 夫***
片 木 威**** ・ 坂 本 研 也****
橋 本 武****

Diagnosis of Fuel Oil Line for Marine Diesel Engine by Sense of Touch —The 2nd Report—

By Huang Yun-Qian, Tetsuo Naka, Takeshi Katagi, Kenya Sakamoto, Takeshi Hashimoto

The experienced crew can diagnose the fuel oil line by the touch on the fuel injection pipe. The first paper discussed the experiment of diagnosing the fuel oil leakage from the fuel pump by the accelerometer fixed on the fuel injection pipe. At abnormal condition, the attenuation time of the signal occurred at the time of combustion becomes longer than that at the normal condition.

This paper presents the experiment of diagnosing the fuel injection valve by the strain gage fixed on the fuel injection pipe. The abnormal condition is simulated the lowering of the opening pressure of the fuel injection valve by the adjustment the spring tension of the valve.

The distinctive signal is found at the time of the fuel injection. This signal at the abnormal condition becomes bigger than that at the normal condition.

1. ま え が き

経験豊かな乗組員はディーゼル機関の燃料高圧管を握ったり、触わったりして、燃料ポンプや燃料噴射弁のスティック等の燃料系統の異常を診断している。筆者らはこのような乗組員の触覚による診断方法を模擬する異常診断システムの開発、研究を行っている。

前報¹⁾では燃料高圧管の振動を圧電型加速度センサで検出し、燃料ポンプからの油漏洩異常の診断を行った。その結果、加速度センサで検出される振動は燃料爆発時に生じ、異常に伴う燃料爆発状態の変化に従い変化することがわかった。そして、燃料ポンプからの油漏洩異常に対しては、燃料高圧管に取り付けた加速度センサで診断可能であることを示唆

した。しかしながら、加速度センサが雑音を拾い易いこと、ならびにこの方法では燃料噴射時の振動が観測されず、燃料噴射弁のスティックの診断までは期待し難いと考えた。

そこで今回の実験は、上記問題点を考慮してセンサは加速センサとひずみゲージを併用した。また異常は燃料噴射弁の異常を想定し、燃料噴射弁のばね引力を調整することで啓開圧力を変化させた。本稿はその実験結果をまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験に用いたディーゼル機関は前報で用いたものと同一であり、その主要目を表1に示す。

図1は測定装置の概要を示す。図2に示すように加速度センサとひずみゲージを燃料高圧管に取り付けた。そしてそれらからの信号をアンプを通してデータレコーダに収録した。加速度センサは前報同様、圧電型で、周波数特性 5 Hz~10 kHz、電荷感度 54.7 pC/G のものを、ひずみゲージは抵抗特性 120

*原稿受付 平成4年2月26日

平成3年秋季学術講演(平成3年11月7日)

**正会員 海上海運学院(中華人民共和国上海市200135)

***正会員 弓削商船高等専門学校(愛媛県越智郡弓削町下弓削1000)

****正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

表 1 供試機の主要目

型 式	松井 MU323DGSC 船用堅型単動 4 サイクル
シリンダ数	3
シリンダ径	230 mm
行 程	380 mm
連続最大出力	400 ps {294.2 W}
回 転 速 度	420 rpm {7 Hz}

図 1 測定装置の概要

図 2 センサの取り付け

Ω ，出力特性 $100 \mu \varepsilon = 2 \text{ v}$ のものを使用した。

またピストン上死点信号を光電式検出器で検出した。なお、対象シリンダは No. 2 シリンダとしている。

2.2 燃料高圧管のひずみ 燃料高圧管は鋼で作られたパイプ (STS35) で、管内の圧力変化によるひずみは厚肉円筒におけるひずみとして求められる。円周のひずみ ε_t を (1) 式で、軸のひずみ ε_z を (2) 式で計算した²⁾。

$$\varepsilon_t = \frac{P_1(2-\nu)r_1^2}{E(r_2^2-r_1^2)} \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{P_1(1-2\nu)r_1^2}{E(r_2^2-r_1^2)} = \frac{1-2\nu}{2-\nu} \varepsilon_t \quad (2)$$

ここで P_1 : 内圧 [kg/cm^2]

r_2 : 外半径 [cm] = 0.5

r_1 : 内半径 [cm] = 0.15

E : 縦弾性係数 [kg/cm^2] = 2.1×10^6

ν : ポアソン比 = 0.3

今、正常時における内圧 $260 \text{ kg}/\text{cm}^2$ {25.5 MPa} でひずみを求めると、 $\varepsilon_t = 20 \times 10^{-6}$ 、 $\varepsilon_z = 4.9 \times 10^{-6}$ となる。したがって円周と軸のひずみは同じ程度になる。そして、ひずみゲージを円周方向と軸方向に取り付け計測した結果、軸方向のひずみの方が顕著に現れたので、本実験では、軸方向ひずみについて考える。

2.3 異常の設定 燃料噴射弁の異常は、ノズルのニードル弁当り不良、カーボンフラワの付着、ノズルのニードル弁のスティック及び圧力調整ねじのゆるみによる啓開圧力の低下などがあるが、本実験では圧力調整ねじのゆるみによる啓開圧力の低下異常を想定して、啓開圧力を変化させ、三本の燃料噴射弁を用いた。正常時の啓開圧力を $260 \text{ kg}/\text{cm}^2$ {25.5 MPa}，異常 1 を $195 \text{ kg}/\text{cm}^2$ {19.1 MPa} (正常時の 75 %)，異常 2 を $130 \text{ kg}/\text{cm}^2$ {12.7 MPa} (正常時の 50 %) とした。

そして、各々の燃料噴射弁を用い、機関回転数 380 rpm 一定で、無負荷時と 3/4 負荷時で実験を行った。

3. 解析方法と結果

3.1 解析方法 表 2 に供試機の弁調整表を示す。これから光電式検出器で検出された上死点信号を基準として、吸排気弁のタイミングチャートを作成した。

データレコーダに収録されたデータを、原波形観測、周波数解析、フィルタ解析し、その結果に上記タイミングチャートを付記して考察を行った。

3.2 原波形観測 図 3 は原波形観測結果を示す。上から順に (a) ひずみゲージによる無負荷時、(b) ひずみゲージによる 3/4 負荷時、(c) 加速度センサによる 3/4 負荷時の波形を示す。ひずみゲージと加速度センサでの波形を比較すると、加速度センサ

表 2 弁調整表

シ リ ン ダ No.	1	2	3
排 気 弁	開 (下 死 点 前) 度	65	65
	閉 (上 死 点 後) 度	42	40
吸 気 弁	開 (上 死 点 前) 度	75	75
	閉 (下 死 点 後) 度	33	32
燃料ポンプ	噴射始め (上死点前) 度	15.5	16
正 常 噴 射 圧 力	260 kg/cm ² {25.5 MPa}		
点 火 順 序	1-2-3

図 3 原波形観測結果

による波形は全体に雑音のがっており、弁タイミングとの照合が難しい。また、ひずみゲージによる無負荷時と負荷時では同様の波形となっている。これらのことから、これからの考察はひずみによる負荷時の波形で行うことにする。

図から正常、異常にかかわらず、上死点前約 15° から振動が始まっている。これは表 2 に示すタイミングセットの噴射始め上死点前 16° と一致し、燃料噴射による振動が検出できている。また、上死点後

に衝撃的な振動が生じている。そしてこの振動が異常時、正常時に比べ振動が大きかつ振動減衰時間が長くなっている。この結果は「上死点後の振動は燃焼爆発によって生じる」という前報での考察結果と矛盾する。そこで、これまでの実験結果を総合して、「上死点後の振動は燃料高圧管の圧力差によって生じる」と仮定する。この仮定から異常時に振動の振幅が大きくなり、かつ減衰時間が長くなるのは、異常時燃料高圧管内の残圧が低く、燃料噴射時との圧力差が大きくなるためと考えられる。

次に、他シリンダの影響を検討するため No.2 シリンダの燃料を遮断し、No.2 シリンダを燃焼させない実験を行った。その時の振動波形を図 4 (a) に示す。この結果を踏まえ、(b) に示す正常時の振動波形を考察する。これらから、燃料噴射時以外で 240° 毎に観測される振動は、隣接シリンダの燃料ポンプからスピルした燃料油の圧力波と考えられ、他シリンダの爆発による影響はないと言える。

3.3 周波数解析 正常時と異常時で、燃料噴射時の波形の周波数成分に変化があるかどうかを検討するため周波数解析を行った。

上死点前 45° (20 ms) ～ 後 136° (60 ms) 間を 30 回加算平均した波形を図 5 に示す。そしてこの波形の周波数解析結果を図 6 に示す。この図から、正常時と異常時では 100 Hz ～ 200 Hz 付近成分のスペクトルが異なっている。特に正常時 200 Hz に存在したスペクトルが、異常の度合いに伴い 180 Hz, 160 Hz となっている。

図 4 隣接シリンダの影響

図5 燃料噴射時の波形

図7 フィルタ解析+絶対値処理

図6 周波数解析

3.4 フィルタ解析 周波数解析結果から正常時 200 Hz のスペクトルが異常の度合いに伴い 160 Hz, 180 Hz と変化することがわかったので、周波数帯域 160 Hz ~ 200 Hz, ゲイン 12 dB のバンドパスフィルタによるフィルタ解析を行った。そしてその波形の減衰状態を認識し易くするために、フィルタ解析結果に絶対値処理を施した。その結果を図 7 に示す。これから、原波形観測結果同様、異常時には振動が大きく且つ減衰時間が長くなっていることがわかる。そしてこの解析によって、原波形観測よりもこれらの事が明確に認識できるようになった。

4. あとがき

本稿は燃料高圧管に取り付けたひずみゲージによってディーゼル機関燃料系統の異常を診断したものである。

その結果は次のようにまとめられる。

- (1) 振動は機関のタイミングセット通りの燃料噴射時時期から観測され、続いて燃料高圧管内の圧力差による衝撃振動が観測される。そしてこの振動が異常時には振幅が大きくかつ減衰時間が長くなっている。このことはフィルタ解析+絶対値処理を行うことで、より一層明確になる。
- (2) 燃料噴射時以外で 240° 毎に観測される振動は、隣接するシリンダの燃料ポンプからの燃料油の圧力波と考えられる。そのため、検出される振動には他のシリンダの爆発の影響はないと言える。
- (3) 周波数解析結果から、正常時と異常時では 100 ~ 200 Hz 成分のスペクトルが異なる。特に正常時 200 Hz に存在したスペクトルが、異常の度合いに伴い 180 Hz, 160 Hz と低くなっている。

以上の結果から、燃料高圧管に取り付けたにずみゲージによる燃料系統の異常診断の可能性が示された。

今後、シリンダ内圧や高圧管内圧と振動の関係を明らかにするとともに、燃料系統の種々の異常を診

断する実験を行っていきたい。そして、人間の触覚が何を検出しているのかという人間工学やセンサ工学等を包含する大きな問題にも挑戦していきたい。

なお実験に際しては、弓削商船高等専門学校の松下邦幸先生の御協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 片木ほか2名, 触覚による船用ディーゼル機関燃料系統の異常診断—第1報—, 舶機誌, 27-3, (1992-3)
- 2) 湯浅, 材料力学公式集, コロナ社, (昭51-3)

[質 疑 応 答]

質問者 三井造船 遠藤裕之

〔質問〕 高圧管内変動による歪は、軸方向歪よりも方向歪の方が大きいと思われる。また軸方向歪は、シリンダカバー、燃料ポンプの変位等、圧力変動以外の変化の影響も受ける。圧力変動を検出する場合、軸方向歪よりも周方向歪の方が優れていると思われるが、何故軸方向歪を採用されたのでしょうか。

〔回答〕 本文で述べましたように、内圧を受ける厚肉円筒における計算では周方向歪と軸方向歪は同じ程度になりました。そしてひずみゲージを周方向

と軸方向とに取り付け計測した結果、軸方向歪の方が顕著に現れましたので、本実験では軸方向歪を採用しました。

また、シリンダカバーや燃料ポンプ等の変位の影響も懸念されましたが、燃料ポンプ入口弁の閉鎖や燃料ポンプカットなどの実験を行ったところ、これらの影響は高圧管に取り付けたひずみゲージには検出されませんでした。

質問者 神戸商船大学 菊池潤

〔質問〕 燃料系統の異常を模擬する設定として、燃料噴射弁の開く圧力を正常時の75%、50%と選択されたとの事ですが、実際の船の現場では何%位に下がる異常が多いと考えられるのでしょうか。また、熟練度の高いエンジニアは何%位の弁開圧の低下で「異常だ」と診断していると考えられるのでしょうか。御見解を御聞かせ下さい。

〔回答〕 実際の船舶では機関運転中燃料噴射弁啓開圧力を測定することは難しく、燃料噴射弁異常時に啓開圧力が何%低下しているかは正確に把握できません。そのため経験上、触覚以外にも温度や圧力に異常の兆候が現れると思われる50船%を基準にしました。なお、今回の実験で熟練したエンジニアは触覚により75%、50%の両方の異常とも正常時との差は感じとれたそうです。