11 ディーゼルエンジンの排ガス対策における 燃料噴射管内キャビテーション可視化の例

日野自動車工業 ㈱

塩崎 忠一[○]、末永 紘一、鈴木 孝幸

The Example of Cavitation Bubbles Visualization in Fuel
Injection Pipe Line of Diesel Engine on Reduction of Exhaust
Emission

by Tadakazu SHIOZAKI, Koichi SUENAGA
and Takayuki SUZUKI

In order to reduce particulate and NOx emission from the direct injection diesel engine, most researchers have been expecting the utilization of higher injection pressure and injection rate for improvement of diesel combustion. In the case of pump-line-nozzle system, the injection pipe line is very important with regard to the higher injection pressure. Namely, the pipe line must be able to resist not only high pressure but also cavitation erosion.

In this paper, the effect of sharp cutting at the end of fuel injection for change of fuel injection rate is discussed along with the visualization of cavitation bubbles in the injection pipe line. And the countermeasure of cavitation erosion is also described.

1. はじめに

燃料噴射装置は、ディーゼルエンジンの燃焼改善において非常に大きな影響度を持っている。エンジンから排出されるガスの中に含まれているNOxや黒煙を低減する為には、燃料噴射圧の上昇や燃料噴射率の最適化が非常に重要である。しかしながらこの場合には、燃料噴射管が高圧に耐え得ること及びキャビテーションエロージョンに耐え得ることが必要となる。本論文は、燃料噴射管内キャビテーションの可視化を行い、キャビテーションが崩壊する時生ずる高周波振動とキャビテーションエロージョンとの関係を把握し、そのキャビテーションエロージョン対策について説明する。

2. 排ガス低減の為の燃料噴射系の変遷とその問題点

排ガス規制が段階的に厳しくなるにつれ、燃料噴射圧や噴射率に対する要求が変化している。図1に NO_x 規制値の推移と、それに対応した燃料噴射管内圧の変化を示す。 NO_x 規制値が高レベル時の噴射圧波形は図1の①の形であり、 NO_x 規制値が低レベル時の噴射圧波形は②の形である。①は②に比較し噴射圧は低く、噴射終りは圧力降下がなだらかである。②は噴射圧は高く、噴射終りは急激に圧力が低減している。即ち一般に NO_x 低減を行う場合、燃料噴射時期の遅延（タイミングリタード）が行われるが、この場合黒煙が増加する。増加した黒煙を低減させる為、燃料噴霧の微粒化を狙った燃料噴射圧上昇が行われている⁽¹⁾。更に燃料噴射の終りを機敏に完了させること（シャープカット）により、噴射後期においても燃料の微粒化を維持し、且つ短期間に燃焼を完了させている。このシャープカットを行う方法としては、燃料噴射ポンプに設けられたデリバリーバルブ（図7、後述する）の吸い戻し量を増加させる方法等が採られている。

この場合、噴射後期において急激な圧力減少によるシャープカットを図るため、噴射管内は負圧になり、キャビテーションが多数発生する。このキャビテーションは、管内圧の上昇時に崩壊することが考えられ、噴射管内面に接したキャビテーションは崩壊時に噴射管内面にキャビテーションエロージョンを発生させることが推定される。

3. 燃料噴射管内の可視化装置

上記の仮説を確認する為には燃料噴射管内を可視化することが重要である。図2は燃料噴射装置の単体テスト装置である。一般に燃料噴射管内圧は $700 \sim 800 \text{ kg/cm}^2$ と高い為、可視化した例は少ないが、下記の様な工夫により可視化を行った。即ち、噴射管内の可視化部分は燃料噴射ポンプ出口部とし、図3の様に可視化用の透明な石英ガラスパイプを従来の鋼鉄パイプの間に挿入した。このガラスパイプ内の燃料の動きをストロボスコープの同期による照明にて撮影した。

Fig.2 Schematic drawing of test equipment for flow visualization of fuel in the pipe

Fig.1 Regulated Emission level and fuel injection pressure pattern

Fig.3 Glass pipe for flow visualization of fuel in the pipe

4. 可視化実験の結果

図4は上記装置を用いて撮影した燃料噴射管内写真（下側）、及びその気泡の模式図と燃料噴射管内圧写真（上側）である。これらの写真により、燃料噴射以前にかなりのキャビテーションが存在することが判った。既に存在するキャビテーション（図中の写真No.1）は圧力上昇と共に、消失（崩壊）し（No.2）、噴射完了と共に再び生成する（No.3）。これは、管内圧がデリバリーバルブの吸戻し作用により負圧になった為である。その後、反射波による管内圧力上昇でキャビテーションが崩壊、減少している（No.4）このキャビテーション崩壊の為、管内圧波形は高周波を含んだ出力波形になっている。その後、噴射管内圧は安定するがかなりのキャビテーションが存在する（No.5）ことが判った。

5. キャビテーションの崩壊とキャビテーションエロージョンとの関係

図5は噴射管内圧と噴射管にAE計(Acoustic Emission Counter)

を付け、振動を計測した時の出力波形例であるがキャビテーションの崩壊を示す高周波の振動が発生している。特に噴射終了後の反射波の圧力上昇始めは出力ピークが大きく、この部分のキャビテーション崩壊がキャビテーションエロージョンに影響を与えているものと推定される。図6はAE計高周波振動のカウント数を燃料噴射ポンプの回転数を横軸にして整理したものである。その結果、キャビテーションエロージョンが発生する燃料噴射ポンプの場合、カウント数の高いことが判明した。従って、噴射管内には可能な限りキャビテーションを発生させないようにすることがキャビテーションエロージョン対策の重要項目である。

Fig.4 Generation and collapse of cavitation bubbles in fuel injection pipe according to the injection pressure wave

Fig.5 Typical data of fuel injection pressure and output of AE counter

6. キャビテーションエロージョンの対策

燃料噴射管内に存在するキャビテーションを少なくする為、燃料噴射ポンプ出口に装着されているデリバリーバルブ（図7）の燃料通路の一部に燃料吸い戻し効果を和らげるための細孔を持ったダンピングバルブを挿入した。この結果燃料噴射圧は図8（b）から（a）に変化した。噴射管内にキャビテーションの生成する様な負圧領域が少なく、その生成の可能性が減少している。従って、ダンピングバルブ有無によるキャビテーションエロージョンの差を確認すべく、耐久テストを実施した。図9は耐久テスト後の燃料噴射管の断面写真の一部であるが、ダンピングバルブの有無でキャビテーションエロージョンに明確な差のあることが判明した。

Fig.6 Comparison of count number of AE counter using the pump induced cavitation erosion and not induced cavitation erosion

Fig.7 Delivery valve installed in fuel injection pump

Fig.8 Comparison of fuel injection pressure wave pattern with and without damping valve

Fig.9 Micro-photographs of pipe section after 5×10^6 times injection

7. まとめ

排ガス低減対策を行うことにより、燃料噴射管のキャビテーションエロージョンが問題になる。燃料噴射管内をガラスパイプを用い、ストロボライトの照明で可視化することにより、燃料噴射管内の流れを観察した結果、多量のキャビテーションの発生並びに崩壊が繰返されていることが判明した。更にAE計を用いてキャビテーションの崩壊がキャビテーションエロージョンに影響することを把握し、このキャビテーションを低減すべくダンピングバルブを挿入した結果、エンジンの性能をそこなうことなくキャビテーションエロージョンを防ぐことができた。

参考文献

- (1) T. Shiozaki et al : Low Emission Combustion Influences Durability of Fuel Injection Pipe Line and Treatment of the Pipe, SAE paper 871614.