ディーゼル燃料噴射管内のキャビテーションに関する研究*
(第1報, 負圧とキャビテーション気泡の同時計測)榊 原 康 文*¹, 山 田 豊*²Cavitation in the Diesel Fuel Injection Tube
(1st Report, The Same Time Measurement of Negative Pressure and Cavity)

Yasufumi SAKAKIBARA and Yutaka YAMADA

Recently, high-pressure injection system have been used in many fuel injection pumps. This system is effective in improving fuel consumption, exhaust performance and so on. When the injection pressure is very high, however, cavitation erosions take place. Cavitation erosions in the fuel injection system of the diesel engine are very harmful to the performance and reliability of the engine. Hence it is difficult to adopt high-pressure injection. Cavitation phenomena depend on negative pressure. They have been studied from various up to now. However, there have been no reports on measuring negative pressure. So we trial manufactured a device to measure negative pressure exactly. We measure negative pressure at the same time as cavities by using a system to observe cavitation and a device to measure negative pressure. Then this report determines the relationship between negative pressure and cavities.

Key Words: Cavitation, Fuel Injection System, Device to Measure Negative Pressure, System to Observe Cavity

1. 結 言

近年, 自動車用ディーゼルエンジンは, 排気ガス対策と燃費性能向上のため燃料噴射圧を上げて, 噴霧を微粒化し, 噴射時期を短縮する方向に進んでいる。しかし, これに伴い, 異常噴射特性, 二次噴射および不整噴射がそれだけ生じやすくなり, さらに高回転・高負荷域では, 燃料噴射系においてキャビテーション, およびそれに起因するエロージョン(壊食)の発生という問題がより顕著に起きてくる。特に, 燃料噴射系におけるキャビテーション・エロージョンは, 機器の損傷を引き起こし, エンジンの性能と信頼性のうえで, 非常に重要な問題となっている⁽¹⁾。

このためキャビテーションは, 従来燃料の高噴射圧化, 高噴射率化が望ましいにもかかわらず, これをある圧力以上に高めることができないという理由の一つとなっている。

ディーゼル燃料噴射系においては, 流れは非定常性が極めて高く, キャビテーションの発生は流速の増加によるのではなく, 噴射時間の短縮と二次噴射防止のため

に行われる吸戻し作用によって生じた負圧が, パイプ内を伝ばするためである。このように燃料噴射系におけるキャビテーションおよびエロージョンは他の流体機械とは異なる特異性をもっている。これまで, 燃料噴射系でのキャビテーション・エロージョンの現象解析, エロージョンの発生予測等の研究^{(2)~(5)}が行われてきているが, キャビテーションの発生要因である負圧の正確な値を求めようとしても, 圧力は数十MPaの大きさから急激に変化するためまだ求められていない。そこで本研究では負圧を正確に測定するため, 数十MPaの高圧に耐える強度をもちながら, 大気圧近傍のわずかな負圧を正確に測定でき, しかも噴射特性およびキャビテーションの発生に影響を与えない負圧測定装置の試作を行った。ひきつづいて, 噴射管内の負圧とキャビテーションの発生の状況を解明するため, 同時計測を試みた。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 実験装置の概略を, 図1に示す。噴射ポンプの動力源としてモータを使用した。噴射ポンプは, A形6気筒を使用した。また, ノズルは, 噴口径×数: $\phi 0.25 \times 5$, 開弁圧: 22 MPaのホール形ノズルを使用した。噴射管は内径2 mm, 外径6 mm, 長さ

* 原稿受付 平成6年6月21日。

¹ 准員, マルヤス工業(株) (〒444 岡崎市橋目町北山1)。² 正員, 愛知工業大学 (〒470-03 豊田市八草町八千草1247)。

図1 装置概略図

900 mm である。噴射管内の圧力およびキャビティの計測に際しては、6 気筒のうちの 1 気筒を使用した。各装置からの信号は、アンプで増幅したのち、オシロスコープにて観測した。また、その波形は、コンピュータに転送したのち、プロッタにより取り出した。

実験時のポンプ回転数は 1000 rpm から 1400 rpm まで 200 rpm ずつ変化させた。供試デリバリバルブは、吸戻し量 59 mm³ を用いた。タンク内油温は 40°C から 45°C に管理した。

2・2 噴射圧測定装置と負圧測定装置 噴射時に発生する高圧を測定するために製作した噴射圧測定装置の概略図を図 2 に示す。装置内部の管路の径は噴射管内径(φ2 mm)と同じである。両端にはねじ部を施しコネクタを介し噴射管に取付けた。噴射圧を測定するため、ひずみゲージの抵抗線部分(長さ 1 mm, 幅 0.68 mm)を管路の中心に合せてはり付けた。また、その部分の管壁の厚さは 0.2 mm である。吸い戻し時に発生する負圧を測定するために試作した負圧測定装置の概略を図 3 に示す。この測定装置はダイヤフラムとカンチレバーを組合せた圧力測定装置である。ダイヤフラム(厚さ 0.15 mm)の上部が大気圧であるために、管内に負圧が生じた際、ダイヤフラムは下側へたわむ。そのたわみは、連結棒を介してカンチレバーに伝わり、カンチレバーのひずみ量から圧力を測定する。ダイヤフラムと連結棒は銀ろう付けによって固定した。また連結棒は、上部のカンチレバーに対して、ねじと接着剤で固定した。この固定は、大気圧近傍の正圧を知るためである。カンチレバーの詳細は図 4 のようであり固有振動数を上げるために、固定端、ひずみゲージ接着部分から先端に向かって幅のみを狭めた。また、噴射時の高圧に対しては、ダイヤフラム上部壁によって保護されるような構造とした。よってこの装置は大気圧近傍の正圧および負圧のみを測定する装置で

図2 噴射圧測定装置

図3 負圧測定装置

図4 カンチレバー

ある。この装置の固有振動数を実測するため、管内圧力を真空にしたうえで、カンチレバーの先端に衝撃を与えてみたが、減衰が大きく、振動しなかった。これは、大気圧の下でダイヤフラムとカンチレバーを連結棒を介して固定した後、管内を真空にした場合図 4 のカンチレバーの寸法のカンチレバーについて、先端部のたわみを求めると 4×10^{-3} mm で極めて小さく、したがって管内を真空にしてもダイヤフラムの大部分は、上部壁に接したままであるからである。そこで図 4 と同一寸法のカンチレバーを製作してゲージを接着し、固有振動数を求めたところ約 7 kHz であった。測定には差し支えない値と思われる。なおこの負圧測定装置の製作上の困難な点は、ダイヤフラムと O リングおよび連結棒との間の漏れ止めにあった。

2・3 負圧測定装置の校正 負圧測定装置の校正は正圧側はコンプレッサを、負圧側は真空ポンプを用いて行った。ひずみゲージは 4 枚用いひずみは静ひずみ計を用いて計測を行った。図 5 に校正曲線を示す。グラフにより次の関係が得られる。

$$P = 3.04 \times 10^2 \times \varepsilon \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (1)$$

なお正圧側は負圧側のように、リニアな特性となっていない。その理由はダイヤフラムが装置上壁に接して保護されるため、これ以上のひずみが出ないようになっているためである。0.1 MPa の圧力変化で $300\mu\epsilon$ 以上のひずみを示しているの、負圧の測定に十分な精度をもっている。

図5 校正曲線

図6 キャビティ観察システム

2.4 キャビティ観察システム おもなシステム構成要素はレーザ光源、光ファイバ、アンプ、オシロスコープおよびキャビテーション観察治具である。キャビテーション観察治具の管径は噴射管内径と同様 2 mm とし、観察治具内には、レーザ光を透過させるのに適したアクリル製観察窓を挿入した。キャビティ観察の原理を図6に示す。アクリル製観察窓にレーザ光を照射する。観察窓においてキャビティが発生していないのであれば、レーザ光は散乱せず直進する。キャビティが発生すれば、レーザ光はキャビティにより散乱し通過光が減少する。観察窓を通過したレーザ光を光ファイバでとらえフォトダイオードに導いた。フォトダイオードによって生じた光起電力をアンプにて増幅を行った。つまりこのシステムは出力電圧の低下度合いからキャビティ発生状況の観察を行うものである。キャビティと出力電圧との校正は行っていないので、出力レベルは電圧値で示した。実験に際して、油の中に気泡がまったく存在しない場合の出力電圧は 4 V、レーザ光の電源を切つて、フォトダイオードにま

図7 計測装置配置図

図8 噴射圧-負圧同時計測波形 (Time/div=2 ms)

図9 噴射圧-負圧同時計測波形 (Time/div=20 ms)

まったく光を照射しない場合は0 V に調整をした。

3. 実験結果および考察

3・1 噴射圧と負圧の同時計測 測定に際して、各測定装置は図7のように装着した。なお、ポンプと負圧測定部との間隔は50 mm、負圧測定部と噴射圧測定部の間隔は90 mmである。実験に際し燃料噴射ポンプは6気筒とも使用するが、計測はそのうちの1気筒を用い、回転数は1000, 1200, 1400 rpmについて計測した。また、ラック位置は、1000 rpm のとき、噴射量が80 mm³/ST なる位置に固定をした。

図8, 9に、測定結果を示す。各図の上側に負圧、下側に噴射圧を示す。図8に示す測定結果はTIME/DIV=2 msである。これらは、1回の噴射のサンプルの意味あいとらえたものである。ここでサンプルという表現を使ったのは、図9(TIME/DIV=20 ms)の長時間記録波形に示されるように毎回の噴射状態、特に、吸戻し作用直後に発生する負圧(図中矢印部)と、その次の噴射までの管内圧力(残圧)が噴射ごとに微妙

に変化しているからである。このことは後に述べるキャビティ観察結果にも同様のことがいえる。こうした現象は、大気圧近傍の圧力を正確にとらえる手段を得たからこそ計測可能となったが、これまで、あまり報告例がなく、興味深い現象といえる。ここで、各測定結果の負圧計測波形の正圧側には、便宜上0.2 MPaまで目盛を打ってあるが、図5からも明らかなよう、実質上は0.05 MPaぐらいまでしか、装置の直線性はないものと思われる。よって、各図とも0.5 MPaを超えて表示されていたり、高周波の乱れが示されていたとしても、実際その瞬間、どれだけの圧力上昇があったかは、負圧測定波形からは、知ることはできない。

図8, 9における負圧測定結果より、残圧は負圧(大気圧以下)であり、回転数による残圧の変化はあまりないことがわかる。また、残圧は負圧になっていることと関連して、負圧測定波形の一次波の立上り部分を注目すると、高周波の乱れを確認できる。

これより、噴射直前の状態ですでに、空気渦が存在しており、噴射時の圧力上昇によって気泡が崩壊し、負圧測定波形の一次波立上り部分で、高周波の乱れが生じたものと考えられる。このことは、後に述べるキャビティ観察波形においても、明らかである。また各図の二次波中、三次波中にみることのできる高周波の乱れ部においても、気泡の崩壊が起こっていると思われる。

3・2 負圧とキャビティの同時計測 測定に際して、各測定装置は図10のように装着した。なお、ポン

図10 計測装置配置図

図11 負圧-キャビティ同時計測波形 (Time/div=2 ms)

図12 負圧-キャビティ同時計測波形 (Time/div=20 ms)

プと負圧測定部との間隔は 50 mm, 負圧測定部とレーザー光照射部との間隔は 100 mm である。

図 11, 12 の上側にキャビティ, 下側に負圧の計測結果を示す。

1 000 rpm における一次波後の負圧は, 0 MPa (大気圧) 程度である。また, 残圧については -0.05 MPa 程度の負圧を次の噴射時まで維持していることから, 噴射管内全域に微量の空気泡が存在しているものと推測される。

1 200 rpm においては一次波後, 二次波後の負圧は -0.05 MPa 程度発生しており, 1 000 rpm に比して圧力は低い。また, キャビティ観察波形においては, 一次波後のキャビティ発生はみられないが, 図 11 より二次波後には時折かなりのキャビティが発生しているのがわかる。また, 図 11(a) と図 11(b) を比較すると残圧期間の圧力はほぼ等しく -0.05 MPa 程度であるが, キャビティの発生は図 11(b) のほうが多いことがわかる。これは回転数の増加に伴う管内流速増加の結果, キャビテーション係数が減少したことにより噴射時でもキャビティ観察装置では検出しきれない微細な気泡が存在したままであり, 吸戻し時の負圧によってこの気泡が成長したと考えられる。このことはキャビティの発生, 成長が気泡核の存在に依存するという観点からも十分考えられる。

1 400 rpm では負圧およびキャビティ観察結果ともに 1 200 rpm と同様な波形である。図 11(c) では一次波後, 二次波後に -0.1 MPa 程度の負圧の発生がみら

れるが, 長時間記録波形である図 11(c) では平均して 1 200 rpm と同じであると判断できる。また, キャビティ観察波形についても, 発生ポイント, 発生レベルは同じと判断できるが, 時折激しいキャビティの発生しているサイクルもある。これはポンプに流入した軽油中に含まれていた空気泡が一時的に増加し, これが気泡核となってキャビティの成長につながったのではない。

また, 各回転数において残圧期間中に出力電圧低下がみられるが, 残圧が軽油蒸気圧に比して高いことから, 空気泡による出力電圧低下と思われる。

負圧測定の際, キャビティ観察治具の有無は流れに影響を与えないので, 測定値に影響はない。しかし噴射圧測定装置を装着すると, 圧力により圧力計測部が拡大されるので, 負圧計測値にある程度影響が現れることが予想される。そこで負圧計測波形を 3・1 節と比較するとキャビティと同時計測した場合のほうが残圧時の負圧および長時間記録波形の圧力振幅がいずれも大きい。なおキャビティを噴射圧と同時に計測した場合によると, 負圧との同時計測および単独の計測に比

図 13 計測装置配置図

図 14 キャビティ単独計測波形 (Time/div=2ms)

図 15 キャビティ単独計測波形 (Time/div=20 ms)

べて、キャビティの発生が少ない。これについては、次報で述べる吸戻し量の大きい場合にはその差は著しいが、これらの波形図は紙数の関係で省略する。

3・3 キャビティの単独測定 キャビテーションの発生は、ちょっとした管内状態の変化、特に管路の途中で流れを乱すであろう要素を接続した場合にはかなり影響を受けるのではないと思われる。その点から、負圧測定装置は図3のように、管路の途中で部屋(円すい部)をもうける構造になっていることから、この周辺で流れが乱されたり、キャビテーションが誘発されると推測される。そこで、キャビティ観察治具だけを装着した状態、つまりできる限りキャビティ発生に影響を与えないと思われるものを取り除いた状態で測定を行い、比較を行った。測定に際して、観察治具の取付位置は図13のようであり、負圧との同時計測した場合の装着位置より100 mm程度ポンプよりとした。図14, 15に測定波形例を示す。図14, 15を、前述の負圧と同時計測した場合と比べると、残圧時における気泡発生の度合いや、気泡発生ポイントなどあまり違いが見られない。装置の分解能、測定ポイントの違いなどが問題になると思われるが、同時測定と単独測定の結果に極端な差異が見られないことから、本研究において試作した負圧測定装置はキャビテーションの発生にあまり影響はないと思われる。

4. 結 言

ディーゼル燃料噴射系においては、噴射特生向上のためにデリバリバルブによって噴射直後に吸戻しを行っており、管内圧力は数十MPaの噴射圧から1 msの間に-0.1 MPaの真空圧近くまで圧力降下を起こす。そしてこの際に生じた負圧によって、キャビテ-

ションが発生しそのキャビティの崩壊が実用上問題とされるエロージョンを引き起こす。しかし、これまで負圧を正確に測定した報告は見当たらない。そこで本研究ではダイヤフラム式の負圧測定装置と、レーザ光源、アクリル製観察窓およびフォトダイオードから構成されるキャビティ観察装置、さらに噴射圧測定装置を製作した。そして吸戻し量59 mm³のデリバリバルブを装着した際の負圧およびキャビティの発生状況の観察を行った。以下にその結果を示す。

(1) 数十MPaの高圧に耐える強度をもちながら、大気圧近傍の負圧を精度よく測定できる負圧測定装置を製作した。この装置を装着した際に、キャビテーション発生に影響はみられなかった。

(2) 残圧時の圧力は-0.05 MPa程度の負圧で、回転数による差異はあまり認められない。また残圧時においても空気泡は存在する。

(3) 噴射圧の測定は、管のわずかの一部分を削って測定するので、噴射系全体に及ぼす影響は軽微であると考えられる。しかし、噴射圧測定装置のほうが負圧測定装置と比較して、キャビテーションの発生に影響することがわかった。

(4) 噴射圧と負圧を同時に測定した場合には、キャビティと負圧を同時に測定した場合に比べ、残圧時の負圧が小さくなる。

文 献

- (1) 藤沢・河合, ディーゼル燃料噴射, (1988), 71, 山海堂.
- (2) 立石・福吉, 内燃機関, 14-4(1975), 11.
- (3) 立石・ほか2名, 機論, 75-642(1972), 1008.
- (4) 立石・ほか3名, 三菱重工技報, 19-5(1982), 544.
- (5) 渡辺・ほか4名, 機論, 55-512, B(1989), 944.