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2報, デリバリバルブ吸戻し量とキャビテーションの関係)榊原 康文*¹, 山田 豊*²Cavitation in the Diesel Fuel Injection Tube
(2nd Report, The Relationship between Retraction Volume
of Delivery Valve and Cavitation)

Yasufumi SAKAKIBARA and Yutaka YAMADA

Recently, high pressure injection systems have been used in many direct injection diesel engines. These systems are effective in improving fuel consumption, exhaust performance and so on. But cavitation erosion in the fuel injection tube is a problem in these systems. Measurement of negative pressure is important to prevent occurrence of cavitation phenomena and erosion in the fuel injection tube. Therefore we trial manufactured a device to measure negative pressure exactly and a measured negative pressure as the same time cavitation bubbles using a system to observe bubbles and a negative pressure sensor. In this work we also determine which retraction volume of the delivery valve does not influence cause of negative pressure and cavitation bubbles. Moreover, we confirmed that when using a low retraction volume delivery valve, growth remarkable negative pressure to such a degree that $-1(\text{atg})$ below.

Key Words: Cavitation, Fuel Injection System, Fuel Injection Tube, Delivery Valve, Negative Pressure Sensor, System to Observe Bubbles

1. 緒 言

世界的に環境問題が取りざたされている中, 自動車用エンジン特にディーゼルエンジンの排ガス対策は急務である。NO_xは酸性雨を引き起こしたり, 生体呼吸器系へ悪影響を及ぼすとされ, 厳しい排出規制の対象となっており, NO_xの国内長期規制においては2000年をめどに規制前排出量の26%までに低減しなければならない。排ガス対策としては, 吸気系, 排気系, 燃料そのものなどさまざまなアプローチの仕方があるが特に燃料噴射系への期待は大きい。ディーゼル燃料噴射ポンプは, 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⁾。

ディーゼル燃料噴射系においては, 噴射特性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, -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, キャビテーションが発生しその気泡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。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, 負圧を正確に測定した報告は見当たらなかった。そこで, 第1報⁽⁶⁾においてはまず, 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ダイヤフラム式の負圧測定装置を試作した。キャビテーションの発生はわずかな管内状態の変化, 特に管路の途中に流れを乱すであろう要素を接続した場合等には, かなり影響を受けるのではないかと一般的には考えられる。そのような視点から, 負圧測定装置は後述するよう, 管路の途中に部屋を設けるような構造になっているので, この装置によって流れが乱されたり, キャビテー

* 原稿受付 1996年3月18日。

*¹ 正員, 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)。

ションが誘発されるのではないかと懸念された。しかし、第1報において、負圧測定装置の装着はキャビテーションの発生に影響しないことが確認されている。さらに、第1報においては、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気泡観察装置を試作し、BOSH-A形ポンプにおいて、負圧および気泡の発生状況の観察結果の報告を行った。

また、第1報ではデリバリバルブの吸戻し量は 59 mm^3 のみの設定で観察を実施した。デリバリバルブの吸戻し量に関しては、一般的に燃料噴射ポンプとエンジンの整合をはかるうえで、耐キャビテーション・エロージョン性、燃費性能、出力特性等、総合的に最良な条件を導き出すよう設定され、種々のデリバリバルブが用意されている。吸戻し量の増減は、すなわちデリバリバルブ作動時における単位時間当たりの噴射管内圧力変化の増減につながることが容易に推測され、キャビテーションの発生に顕著な影響を与えらると思われる。そこで、本報においてはデリバリバルブ吸戻し量を増減させ、噴射管内に発生する負圧とキャビテーションの発生状況の変化を観測したので報告する。

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

Fig. 1 Experimental apparatus

(a) Start of retraction (b) End of retraction

Fig. 2 Retract action of delivery valve

ンプは、BOSH-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900 mmである。噴射管内の圧力および気泡の計測に際しては、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、プロットにより取り出した。

実験時のポンプ回転数は1000, 1200, 1400 rpmとした。供試デリバリバルブは、表1のとおりである。その構造に関しては、図2のとおりであり、リリーフバルブの断面積、ストロークを変化させることにより、吸戻し量を変化させられる。デリバリバルブスプリングの仕様は表2のとおりである。また、供試流体はJIS2号軽油とし、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 吸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負圧測定装置である。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、

Table 1 Detail of relief valve

Retraction volume	Diameter	Stroke
35 (mm^3)	5.95 (mm)	1.26 (mm)
42	5.95	1.51
59	5.95	2.12
70	6.95	1.85
100	6.95	2.64

Table 2 Detail of valve spring

Spring constant	5.88 (N/mm)
Set load	23.52 (N)

Fig. 3 Device to measure negative pressure

Fig. 4 Canti lever

Fig. 5 Calibration curve

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、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、噴射時の高压に対しては、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ある。この装置の固有振動数を実測するため、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には正圧側はコンプレッサを、負圧側は真空ポンプを用いた。ひずみゲージは4枚用いひずみは静歪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。

$$P = 3.04 \times 10^2 \times \epsilon \text{ [MPa]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

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ため、負圧の測定に十分な精度をもっている。

2・4 気泡観察システム 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気泡観察治具である。気泡観察治具の管路径は噴射管内径と同様2 mmとし、観察治具内には、レ

Fig. 6 System to measure cavity

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。気泡観察の原理を図6に示す。アクリル製観察窓にレーザ光を照射する。観察窓において気泡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。気泡が発生すれば、レーザ光は気泡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捕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気泡によるレーザ光の散乱減衰によって、発生仕方、量などを観察している。気泡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って、フォトダイオードにまったく光を照射しない場合を0 Vに調整した。

3. 実験結果および考察

3・1 吸戻し量と負圧の関係 測定に際して、各測定装置は図7のように装着した。また、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1気筒を用い、回転数は1 000, 1 200, 1 400 rpmに、ラック位置についても固定し、その際の燃料噴射量は、すべてのデリバリバルブにおいて約75 mm³/STとした。実験に用いたデリバリバルブの種類は、35, 42, 59, 70, 100 mm³の5種類である。

そのうち、図8, 9に、測定結果の代表例として、回転数1 400 rpm、吸戻し量35, 59, 100 mm³のデリバリバルブを装着した際の管内圧力波形を示す。各図の上側が負圧測定装置波形、下側に噴射圧波形を示す。図8に示す測定結果はTIME/DIV=2 msであり、図9はTIME/DIV=20 msで捕らえた長時間記録波形で

ある。これらの測定結果より、毎回の噴射状態、特に吸戻し作用直後に発生する負圧と、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ことがわかる。このことは後に述べる気泡観察結果にも同様のことがいえる。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まで目盛を打っているが、図5の負圧測定装置校正曲線からも明らかのように、実質上は0.05 MPaぐらいまでしか装置の直線性はない。よって、各図とも0.05 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から、吸戻し量 100, 59 mm³における残圧は負圧であり、吸戻し量 35 mm³は正圧であることが確認できる。つまり吸戻し量の増加に伴い、残圧は低下することがわかる。このことと関連して、負圧および噴射圧、両波形の一次波の立上り部分を注目すると、相違が明らかである。前者の吸戻し量の多い 100, 59

mm³の場合、負圧波形の一次波立上り部分では、高周波の乱れを確認できるが、後者の吸戻し量の少ない場合については、なめらかな立上りを見せている。

このことから、吸戻し量 100, 59 mm³等吸戻し量の多いデリバリバルブを装着した際、噴射直前の状態においてすで気泡が存在しており、一次波による気泡の崩壊により、負圧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。また各図の一次波後、二次波後に見ることのできる高周波の乱れ部においても、気泡の崩壊が起きている。

一般的に、一次波後の吸戻し作用に伴う負圧によって気泡が発生し、二次波の圧力上昇部によって、気泡が崩壊し、その際起こる局所的な圧力上昇により、エロージョンに至るといわれている⁽¹⁾。そのため、一次波後の負圧の強さはキャビテーションおよびエロージョンの発生に密接に関係してくる。吸戻し量が多いデリバリバルブを装着したときほど、より低圧になりうると思われる。一次波後の最低圧力を吸戻し量 35, 42, 59, 70, 100 mm³に対して示すと図10のようになる。吸戻し量 59 mm³以上では、吸戻し量が多いほど低くなるが、それ以下では逆に吸戻し量が少ないほど圧力が低くなる。特に最小の吸戻し量である 35 mm³では、-0.1~-0.2 MPaの値を示し、これは完全真空圧以下の圧力である。以上のような一次波後の負圧(吸戻し作用による負圧)について、吸戻し量との間の関係は単純ではない。

Fig. 7 Disposition of devices

Fig. 8 Wave form of negative pressure and injection pressure
(1 400 rpm, time/div = 2 ms)

Fig. 9 Wave form of negative pressure and injection pressure
(1 400 rpm, time/div = 20 ms)

また、このことと関連して、負圧の発生は単位時間当たりの圧力変化率にも影響されると考えられる。しかし、本実験において使用したデリバリバルブスプリングは前述したとおり1種類であり、当然スプリングがデリバリバルブに及ぼす圧力はおおよそ異なる。このことが、バルブ作動速度に影響を与えていることは間違いなく、吸戻し時の負圧の発生にも影響を与えていると考える。

3・2 吸戻し量と気泡の関係 測定に際して、各測定装置は図11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、負圧測定部とレーザー光照射部との間隔は100 mmである。また、ラック位置は固定し、測定条件は前述のとおりである。

図12, 13の上側に気泡検出結果を、下側に負圧の計測結果を示す。

Fig. 10 Relationship between retraction volume and after pressure of 1st wave (for 50 sampling)

図13の負圧測定波形から、残圧時の圧力の発生状況はいずれのサイクルにおいてもほぼ同程度であるが、気泡検出波形はサイクルごとにより変動しており、キャビテーション現象の非定常性をうかがうことができる。そしてこれは、すべてのデリバリバルブについて同様のことがいえる。

また、吸戻し時に真空(-0.1 MPa)以下の強い負圧を示すのは吸戻し量 35 mm³の場合で、59, 100 mm³ではそのような現象は比較的少なかった。この原因として、吸戻し量 35 mm³の場合、残圧が正の0.1 MPa程度であり吸戻しによって生じた気泡が残圧期間中に消滅するが、59, 100 mm³では残圧は大気圧またはそれ以下であるので、消滅せずに若干残っていることなどが考えられる。

噴射圧は著しく高压であり、この期間中にすべて消滅することも考えられるが、いくぶんにも短時間で噴射は終了してしまうので消滅しきれない気泡が存在しているのではないかと推測する。そのため、吸戻し量

Fig. 11 Disposition of devices

Fig. 12 Wave form of negative pressure and cavity (1 400 rpm, time/div = 2 ms)

Fig. 13 Wave form of negative pressure and cavity (1 400 rpm, time/div = 20 ms)

Fig. 14 Wave form of negative pressure and cavity
(Retraction volume 35 mm^3 , 1 200 rpm)

Fig. 15 Relationship between retraction volume and cavity (for 50 sampling)

が多い 59, 100 mm^3 を装着した場合には真空以下の負圧は発生せず, 35 mm^3 を装着した場合には吸戻し量は少ないが残圧期間中および吸戻し作用直前の状態において気泡は相対的に少なく, わずかな吸戻しでも引張力に耐えることができ, 大きな負圧を発生させると考えられる。吸戻し作用による圧力低下は, 管内に存在する気泡量と密接に関係があるようである。また, その著しい例を図 14 に示す。測定条件は, 吸戻し量 35 mm^3 , 回転数 1 200 rpm である。噴射直後に真空圧以下の負圧が発生しているが, その際気泡は存在していないことがわかる。

そして, 図 15 に示されるよう, 吸戻し量と吸戻し作用直後に発生した気泡の発生による出力電圧低下との間にあまり相関はないようである。また, 残圧時においても気泡観察波形の出力電圧低下がみられたが, 残圧時管内圧力は軽油蒸気圧よりも高いことから, 空

泡の発生つまりエアレーションである。

4. 結 言

一般に液体中には微細な気泡が含まれており, 張力に耐えることはできない。何らかの原因により圧力が低下した場合, 気泡は成長しその後圧力の回復とともに気泡は崩壊し, その際急激な圧力上昇を伴い, これがエロージョンを引き起こす原因となっている。

気泡の崩壊強さが大であると実用上問題となるエロージョン発生に至るのだが, 燃料噴射系におけるキャビテーション発生の防止は一般的に不可能といわれるほど困難であるので, これまで報告されてきた燃料噴射系におけるキャビテーションの研究は, 気泡の発生があるかないかというより, その強さの判定に主眼をおいたものが多い。そして, その判定基準として二次波, 三次波などを FFT に取り込むことによって周波数解析を行う手法がとられてきた。

燃料噴射系のキャビテーションの研究における最終課題は, やはり, 一般的に困難といわれているキャビテーションの発生の防止である。キャビテーション発生は負圧発生に起因する。つまり防止するには第 1 に負圧の状態を正確につかむ必要があると思われるのだが, これまでその報告はされていなかった。

よって, 本研究は, 負圧発生状況と気泡発生状況を示すことに主眼を置き実験を行った。以下にその結果を述べる。

(1) 吸戻し量の大小は, 一概に吸戻し時の気泡発生による気泡観察装置の出力電圧低下および負圧の大きさに関係しない。

(2) 吸戻し量の違いは, 残圧に影響を与える。吸戻し量の増加は, 残圧の低下につながる。

(3) 吸戻し量の少ない場合, 吸戻し作用によって真空圧以下の大きな負圧を生じることがある。

(4) 残圧時においても気泡観察波形の出力電圧低下が確認されたが, 残圧時管内圧力は軽油蒸気圧よりも高いことから空気泡の発生つまりエアレーションである。

文 献

- (1) 藤沢英也・河合静男, ディーゼル燃料噴射, (1987), 79, 山海堂。
- (2) 立石又二・福吉正, 内燃機関, 14-4(1975), 11-14。
- (3) 立石又二・ほか 2 名, 機論, 75-642(1972), 1008-1013。
- (4) 立石又二・ほか 3 名, 三菱重工技報, 19-5(1982), 544-550。
- (5) 渡辺久志・ほか 4 名, 機論, 55-512, B(1989), 944-949。
- (6) 楠原康文・山田豊, 機論, 61-584, B(1995), 1232-1237。