船用ディーゼルノズルの噴霧特性と内部流れに関する研究*

横 部 澄 人** 大 澤 克 幸*** 小 田 哲 也***
住 隆 博*** 藪 田 圭一郎*** 菅 田 秀 平***

Study on Internal Flow and Spray Characteristics of a Marine Diesel Nozzle

By Sumito YOKOBE,

Katsuyuki OHSAWA, Tetsuya ODA, Takahiro SUMI, Keiichiro YABUTA, Shuhei SUGATA

Spray characteristic and internal flow of a marine diesel nozzle were investigated both numerically and experimentally. In this paper, both investigations were carried out using water instead of fuel. Numerical simulation of nozzle internal flow of the nozzle showed that cavitation can occur inside the nozzle holes. In spray visualization experiments, it was observed that penetrations of the sprays in the early stages of injection gradually increased due to an effect of large sac volume. This phenomenon is quite different from that of a small automobile diesel nozzle. Internal flow visualization was also carried out and the appearance of cavitation inside the nozzle holes was consistent with numerical simulation results.

1. はじめに

近年、船用ディーゼル機関から排出される排ガスに関する規制が施行され、今後さらなる規制強化が決められている。この様な中、排ガス中に含まれる有害物質に対する様々な低減技術が各所において精力的に研究、開発されている。また、燃料消費率低減や燃焼改善への研究、開発は長年にわたり研究、開発が継続されており、今後もディーゼル機関が船用機関として使用される限り探究され続ける課題である。

船用大型低速ディーゼル機関の燃焼現象に関する数値計算的研究は、以前から行われているが、燃焼室の幾何学的な大きさや、自動車用エンジン等とは異なる特殊な燃料噴霧形態により、その精度については、自動車用エンジンで行われているものと比べ、改善すべき点が未だ多数残されている。例えば、燃料の燃焼状態を左右する燃料噴霧については、多くの研究がなされているが、燃料噴霧の状態に大きな影響を及ぼす、

燃料噴射弁や噴射ノズル内の流れに焦点を当てた研究は、自動車エンジンに比べて多くなく¹⁾、その現象の理解は不十分と考えられる。

そこで、著者らは、船用大型低速ディーゼル機関の燃料噴射弁および噴射ノズル内の現象に注目して、これらの内部流れが燃料噴霧に及ぼす影響を明らかにし、得られた知見を数値計算に反映させ計算精度を向上させる事を目的として、数値計算²⁾と実験による研究³⁾を行っており、得られた知見は数値計算だけでなく燃料噴射ノズルの設計においても、非常に有益な情報となる。本報ではこのような噴射弁内の流れ構造と噴霧特性について明らかにした結果を報告する。

2. ディーゼルノズル内部流れの数値解析

2.1 解析方法

船用大型低速ディーゼル機関用5噴孔燃料噴射ノズルについて、その内部流れの数値解析を実施した。解析に使用したソフトウェアは、CD-adapco社のSTAR-CCM Ver9.06.009である。また、計算モデルは乱流モデルにRealizable/ $k-\epsilon$ モデル、混相流モデル

*原稿受付 平成27年4月7日。

**正会員 三井造船株式会社(岡山県玉野市)。

***鳥取大学大学院(鳥取市湖山町)。

にオイラー混相流モデルを使用し、今回は、まず、内部流れの特性を確認し、実験との比較を実施するために、液相を水、気相を水蒸気、空気として計算を実施した。

2.2 解析モデル

解析対象とした燃料噴射ノズルは、三井造船株所有の単気筒試験機関用ノズルである。ノズルの概形を図1に示す。

数値解析は、モデルA（5噴孔ノズルの総噴孔面積と等価の面積を有する単噴孔ノズルで、針弁をリフト量0.01mmからフルリフト1mmまで移動させた2次元軸対称形状であり実際の噴射ノズルとは噴孔形状が異なる）および、モデルB（針弁のリフト量を0.01mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.5mmとした5噴孔ノズル、実際の噴射ノズルと同形状）について実施した。

モデルAは、針弁が連続的にリフトする際の内部流れの非定常特性を調べ、モデルBは噴孔内の3次元の内部流れ特性を調査することを目的として解析を実施した。

これらの計算モデルおよび境界条件をそれぞれ図2および図3に示し、概要を表1にまとめる。

なお、今回の解析条件の噴射圧力は、実機の燃料噴射圧力の1/3程度ではあるが、後述する噴射実験装置で実施可能な最高噴射圧力である30MPaとしている。また、大気圧中への噴射としており、まず、ノズル内部流れの非定常特性や3次元内部流れの特性を調査することを目的としている。

図2 2次元軸対称非定常解析モデルと境界条件 (モデルA)

図3 3次元定常解析モデルと境界条件 (モデルB)

表1 計算モデルの概要

	噴孔数	噴孔径	セル数
モデルA 2次元軸対称 非定常解析	1	1.566 mm	約7万
モデルB 3次元定常解析	5	0.7 mm	約750万

2.3 解析結果 —2次元軸対称非定常解析—

図4に、解析条件として与えた針弁リフトと、解析結果として得られた流量を示す。針弁上昇時は、リフト量0.3mm付近で流量がほぼ一定となり、下降時は0.3mm付近から流量が減少し始めることが分かる。これは、リフト量が0.3mm付近で流路の最小断面積となる箇所が変わるためと考えられる。この最小断面積となる箇所とは、リフト量が0.3mm付近よりも小さい場合は、針弁の上昇によってできた針弁着座部流路であり、0.3mm付近よりも大きい場合は噴孔となる。これらの流路断面積によって、流量が決まることになる。

図5に、針弁リフトを図4のように連続的に変化した際の、ノズル内流路の軸方向の圧力分布を示す。リフト量が0.3mm付近までは、針弁付近と噴孔出口の圧力が著しく低下し、大きな圧力損失がみられる。一方、リフト量が0.3mmよりも大きくなると、針弁付近での圧力損失は小さくなり、噴孔出口のみで大きな圧力損失が見られる。

図4 針弁リフトと流量

図5 針弁リフト量に対するノズル軸方向の圧力分布

また、リフト上昇時はリフト量 0.1mm, リフト降下時は、リフト量 0.01mm まで、針弁下流にキャビテーションの発生が、ポイド率分布から確認された。

2.4 解析結果 —3次元定常解析—

図6に3次元定常解析で得られた各噴孔の軸方向速度分布を、針弁リフト量毎に示す。リフト量が増加するに従い、軸方向流速が増加していることが分かる。また、サックボリューム部から噴孔内へ流入後、噴孔入口エッジ部から縮流が生じ、下流に向かって有効流路面積が減少していることが分かる。

図7(a)に針弁リフトが 0.5 mm のノズル内の流れ分布と図7(b)に各噴孔内断面の噴孔軸方向速度分布を示す。噴孔断面は、噴孔入口、出口、およびこれらの間の3断面の合計5断面を示している。図7(a)では、サック

ボリュームの上方に位置する噴孔2と噴孔5への流入は、他の噴孔に比べ、サックボリューム中心軸に対して、流線の大きなねじれが見られる。また、全ての噴孔について、噴孔入口のエッジ部から下流に向かって縮流が見られる。図7(b)の噴孔断面速度分布では、入口部から下流側で、断面内の速度は均一ではなく、分布が見られる。例えば、噴孔1では、ノズル断面の上側および下側に速度の遅い領域が見られ、噴孔2では、ノズル断面の下側に速度の遅い領域が見られる。

図7 ノズル内の流れ (a) ,および噴孔断面の速度分布 (b) (針弁リフト : 0.5 mm)

図6 各噴孔断面における針弁リフト毎の噴孔軸方向速度分布

各噴孔の入口および出口部断面速度分布を図8に再掲すると共に、ボイド率分布も合わせて示す。噴孔1では、噴孔流路の上下にキャビテーション発生が見られ、その他の噴孔では、主に噴孔流路下側にキャビテーションの発生が見られる。これは、図7の流線分布より、噴孔1は、サックボリューム内の流れが主に噴孔入口の上方および下方から流入しているのに対し、その他の噴孔では、主に噴孔入口下方から流入しているためと考えられる。また、噴孔内の縮流とキャビテーションの影響により図8に示した様な断面速度分布になったと考えられる。

図9に、各噴孔の流量係数を示す。噴孔1の流量係数が最も大きく、噴孔2が最も小さい結果となった。これは、噴孔位置の違いによる流線分布や断面速度分布の影響により、噴孔毎に有効流路面積の違いが生じた結果と考えられる。

図8 各噴孔の入口、出口断面速度分布およびボイド率分布

図9 各噴孔の流量係数

3. ディーゼルノズル内部流れに関する実験

本研究では、数値解析と並行して、ディーゼルノズル内の流動特性を調査した。以下にその結果を述べる。

3.1 実験装置および実験条件

図10に噴射システムの概要を示す。使用した噴射弁は、単気筒試験機関用のものである。本実験では、水を使用して実験を実施した。水は図10中の高圧水ポンプで昇圧し、噴射弁に供給した。噴射弁は作動油駆動であり、噴射弁の開弁・閉弁タイミングは電氣的に制御した。図11のように供給高圧水圧力 P_{inj} 、駆動油圧力 P_{oil} 、針弁リフト L などはオシロスコープで計測した。

実験に使用した燃料噴射ノズルの概要を図12に示す。ノズルは3噴孔であり、数値解析のモデルとは異なっている。まず、後述する種々の噴射特性を確認することを目的として、図のようなノズルを使用した。

噴射した水は、高速度カメラで撮影し、得られた画像は、噴霧の可視化および、噴霧到達距離の計測等に使用した。表2に実験条件を示す。水の噴射圧力は、実機に比べて1/6程度とかなり低く、大気圧中への噴射である。しかし、使用した噴射ノズルの基本的な噴射特性を理解する上では、有益な情報が得られると考える。

図10 燃料弁噴射システムの概要

図 11 計測システムの概要

図 12 燃料噴射ノズルの概要

表 2 実験条件

Injection Pressure	16 MPa
Hydraulic Oil Pressure	23 MPa
Needle lift	2 mm
Injection duration	40~46 ms

3.2 噴霧の到達距離と噴射率

図 13 に噴射開始後時間に対する噴霧到達距離を示す。この到達距離は、図 14 の様な、高速度カメラで撮影した噴霧の可視化画像から測定したものである。図 13 の噴霧到達距離は、噴孔配置が非対称のため、噴孔毎の到達距離に僅かな差は見られるが、傾向は全噴孔で同様である。この噴霧到達距離で特徴的な点は、噴霧の成長が 2 段階に分けられることである。噴霧到達距離は 3 ms 付近まで徐々に成長し (Stage I)、その後、急速な成長が見られる (Stage II)。

また、今回、噴孔毎に噴射率の計測を実施した。計測には、噴霧モーメント法⁴⁾を用いた。その概要を図 15 に示す。実際の計測では、ノズル噴孔と、センサーとの隙間は 2mm とした。また 縮流係数は 1 としている。噴霧モーメント法による計測の妥当性を

検証するため、噴孔毎に噴射される水の量を計測し、噴霧モーメント法で得られた噴孔毎の噴射率から算出した水の噴射量と比較を行った。その結果、両者は良く一致することを確認している。また、噴射期間中、針弁が上昇または下降して移動するリフト期間は、全噴射期間に比べて短い。つまり、針弁がリフトし縮流係数が時間的に変化する期間が、全噴射期間の噴霧モーメント法噴射結果に与える影響は小さいと見ている。図 16 に、噴霧モーメント法で得られた噴孔毎の噴射率波形 (上段) および、この波形の拡大図 (下段) を示す。全噴孔の噴射率波形について、噴射開始後 2.5 ms 付近で波形にスパイク状の立ち上がりが確認できる。

図 13 噴霧到達距離

図 14 噴霧可視化画像の一例
(噴射弁側面からの撮影画像)

図 15 噴霧モーメント法の概要

図 16 噴霧モーメント法による噴射率計測結果

図 17 に、図 13 の噴霧到達距離計測時の噴霧可視化画像を示す。噴射開始後 1 ms から 3 ms の噴霧の成長に比べ、3 ms から 4 ms で噴霧が急速に成長している様子が明確に分かる。

これらの計測結果から以下のような現象が理解できる。

- ・ 噴霧開始から約 2.5 ms までは、針弁リフトによりノズル内サックボリュームに水が込められると同時に一部が噴孔から噴霧され、この時の噴霧到達距離は図 13 の様に徐々に増加する (Stage I)。
- ・ サックボリューム内に水が満たされると、噴霧到達距離は急速に成長する (Stage II)。
- ・ 図 16 に示したスパイク状の波形は、噴霧が緩やかに成長する Stage I を、噴霧が急速に成長する Stage II の噴霧が追い越す現象が起り、この際、噴射率が急激に増加したために発生したと推測される。

3.3 ノズル内流れの可視化

数値解析結果で述べたように、5 噴孔ノズル (図 3) では、噴孔内にキャビテーションの発生が確認された。そこで実際の燃料噴射弁内での流体挙動を確認するため、アクリル製の可視化用ノズル (図 18) を製作し、内部流動の可視化を試みた。ノズルは数値解析に用いたモデルと同様のノズルサイズ、噴孔配置であり、前述の通り、単気筒試験機関用ノズルと同様である。なお、可視化時に内部流動を観察しやすくするため、外

形の一部を変更している。

水の噴射条件は、単気筒試験機関で 100% 負荷時に燃料 (A 重油) を噴射する際のレイノルズ数と同等とした。キャビテーション数は試験機関に比べてわずかに異なり、今回の実験条件は、キャビテーションが発生しやすい条件となっている。ただし、等倍モデルによるキャビテーションの発生状況の観察や、今後、キャビテーションと噴霧特性の関連をさらに検討する上ではこの実験結果は参考となる。

可視化の画像は、高速度カメラを用いて撮影した。撮影時のノズルの曲率による影響を出来るだけ小さくするため、図 18 の矢印で示した平面に対して垂直な方向から撮影を行った。

図 19 に可視化結果を示す。図中の左側から、可視化ノズル概形図、可視化結果 (針弁リフト量: 0 mm)、可視化結果 (針弁フルリフト時) および、この際の噴孔 2、噴孔 4 の拡大図を示す。なお、これらの拡大図については、流路形状を分かりやすくするために、これを強調して示している。また、図 19 の写真では、気泡は白色、水は黒色となっている。

可視化結果の中の、例えば、噴孔 2 では噴孔の下側に、噴孔 4 では噴孔入口付近の噴孔下側にキャビテーションが発生し、下流にかけて噴孔半径方向にキャビテーションが広がる現象が見られた。キャビテーションは主に噴孔下側で発生している点が、数値解析で得られた結果と同様の傾向を示していると言える。なお、これら噴孔内部に発生したキャビテーションは、その後の燃料噴霧にも影響を及ぼし、噴孔毎に噴霧特性が異なることが考えられる。現在、実験により、この影響を調査している。

図 18 可視化用ノズルの概要

図 17 噴射弁下側からの噴霧可視化画像

4. まとめ

船用大型低速ディーゼル機関の燃料噴射弁内部流れを対象とした数値解析で以下の結果が得られた。

- (1) 5 噴孔ノズルの全ての噴孔入口エッジ部でキャビテーションの発生が見られた。
- (2) 各噴孔断面には噴孔毎に異なる流速分布が見られた。これには、噴孔入口エッジ部の縮流や、キャビテーション発生が影響していると考えられる。

実験により、以下の結果が得られた。

- (3) 噴霧の可視化により、噴霧到達距離は 2 段階 (Stage I, II) で成長する特徴が見られた。
- (4) 噴霧モーメント法による噴孔毎の噴射率計測で、噴射開始直後にスパイク状の噴射率波形が見られた。これは、噴霧が緩やかに成長する Stage I を、噴霧が急速に成長する Stage II の噴霧が追い越す現象が起り、この際、噴射率が急激に増加したために発生したと推測される。
- (5) 実際の燃料噴射ノズルと同サイズ、同噴孔配置のノズルによる内部流動の可視化により、噴孔入口エッジ部でキャビテーションの発生が見られた。

参考文献

- 1) A.Andriotis et.al., CIMAC Congress (2007),262
- 2) 薮田ら, 日マリ学講, 84 回論集, (平 26-11), 27-28.
- 3) 菅田ら, 日マリ学講, 83 回論集, (平 25-9), 165-166.
- 4) 河村ほか 3 名, 第 7 回微粒化シンポジウム・講演論文集, (平 10-12), 271-276

図 19 可視化ノズルによるノズル内流動の可視化結果