

1. 研究背景および目的

近年、地球環境保全の観点から高出力と低燃費を両立できる直噴ガソリンエンジンが脚光を浴びている。今後の厳しい排出ガス規制に対応するためには燃料噴霧特性の更なる制御が必要である。

燃料噴霧の微粒化特性に対してノズル内で生じる液流の乱れやキャビテーション現象が影響を及ぼすことが知られている⁽¹⁾。低圧部において発生したキャビテーションは圧力の高い噴孔部出口に向けて流れると、その圧力により崩壊し液流の乱れや衝撃波を発生させると報告されている⁽²⁾。しかし、詳細な挙動の把握および噴霧特性への寄与度について未だ確固たる知見は得られていない。

本研究では、直噴ガソリンエンジン用の噴射ノズルを対象として、噴孔内部で生じるキャビテーションがノズル内流動および噴霧特性に及ぼす影響の把握を目的とする。本報では、気泡崩壊時の衝撃波に着目し、衝撃波が噴霧特性に及ぼす影響を解明するため、ノズル噴孔部に取り付けられた加速度センサを用いて各噴射条件における衝撃加速度の計測を行った。

2. 実験装置および実験条件

本実験で用いた実験装置の概略を図1に示す。図1より、供試液体をポンペに充填された圧縮空気燃料タンクに圧送し、減衰容器を経て供試ノズルから大気圧場に噴射させた。ノズル内部の可視化を行うため、ハロゲンランプを光源として、ノズル前方に設置したハイスピードカメラ(Photron製、FASTCAM APX RS, 解像度:512×256pixel, 撮影速度:15000f.p.s,

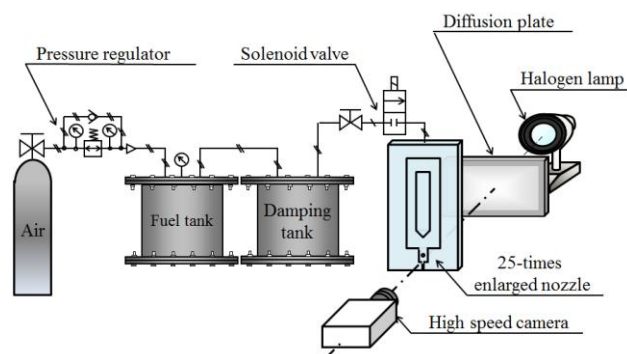


Fig. 1. Computational grid

露光時間:約 0.33 μ s)を用いて撮影を行った。また、本実験では圧力を定常状態とみなせる期間の一部である 600~700ms(以下、定常期間)における撮影画像の比較を行った。この期間に計測される圧力の平均値を噴射圧力 p_{inj} と定義した。

2・2 供試ノズル

本実験で使用した供試ノズルの形状および各計測機器の取り付け位置を図2に示す。供試ノズルは、光学的計測を容易にするため、実機に使用されている寸法を25倍に拡大したアクリル製の可視化モデルとした。また、現象の単純化を行うため、形状は二次元矩形とした。噴射圧力の測定を行うため、噴孔入口のサック部分に半導体式圧力センサ(PMS-5M-2, 周波数特性:1Hz~60kHz, 圧力計測範囲:-100kPa~500kPa, 豊田工機製)を取り付けた。また、ノズル噴孔部の外側に圧電式加速度センサ(PV-08A, 周波数特性:1Hz~30kHz, リオン製)を取り付け、キャビテーション発生による衝撃加速度を捉えた。

3. 実験結果および考察

3.1 噴射圧力とキャビテーション挙動の関係

実験条件を表1に示す。供試液体は水とし、噴射

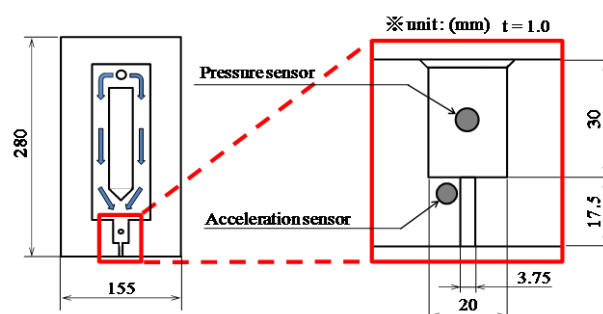


Fig. 2. Nozzle configuration

Table 1 Experimental conditions

Liquid	H ₂ O		
Saturated vapor pressure	p_v	[kPa]	3.2
Injection pressure	p_{inj}	[kPa]	200~400
Ambient pressure	p_{amb}	[kPa]	101.3
Reynolds number	$R_e \times 10^4$	[-]	7.3~12.7
Cavitation number	K	[-]	0.33~0.99
Dissolved air quantity	β	[mg/l]	15.7
Water temperature	T_w	[K]	298

圧力は 250kPa から 400kPa まで 50kPa 刻みで変化させた。図 3 は各噴射圧力に対して得られた代表的な撮影画像である。なお、ノズル内における黒い部分はキャビテーションの気液界面である。図 4 より、噴射圧力を(a) $p_{inj}=250\text{kPa}$ から(d) $p_{inj}=400\text{kPa}$ まで増加させるにつれて、キャビテーション気泡領域は下流方向へと大きく成長し、噴流も広がる。これら噴射圧力とキャビテーション挙動の関係は、宋ら⁽¹⁾に代表される過去の報告例によく一致している。

3.2 キャビテーション崩壊時に生じる衝撃波と衝撃加速度の関係性

キャビテーション気泡の挙動とキャビテーション崩壊時に生じる衝撃波の関係を調査するため、加速度計を用いて衝撃波の振動を計測した。しかし、加速度計によって計測された振動波形には、衝撃波の振動だけでなく、噴射装置の機械的な振動なども含まれている。そのため、振動波形を FFT により周波数分析し、衝撃波による振動を特定した。図 5 に、図 4 における撮影と同時に計測された衝撃加速度の FFT 解析結果を示す。噴孔部入口付近でキャビテーション気泡が発生すると(図 3(a)および(b))、図 4(a)および(b)より周波数スペクトルには 25kHz 付近に強いピークが現れる。そして、発生領域が拡大すると、キャビテーション気膜が形成される(図 3(c)および(d))。この時、図 4(c)および(d)より周波数スペクトルには、3kHz と 13kHz 付近に大きなピークが見られるが、25kHz 付近にピークは観察されなくなる。以上より、キャビテーションと衝撃加速度の関係性を把握した結果、キャビテーション崩壊時に生じる衝撃波は約 25kHz の周波数帯であるとわかった。

衝撃波が噴流に与える影響度を調査するため、図 6 に 25kHz の衝撃加速度および噴流幅を K 数によって整理した。なお、衝撃加速度は最大値で正規化し、噴流幅は噴孔幅 W_h で無次元化してある。図 6 より、 $K \geq 0.55$ の範囲で衝撃加速度の大きさは徐々に増加するが、噴流幅は一定である。一方で、 $K \leq 0.55$ の範囲では、衝撃加速度はほとんど計測されないが、噴流幅は増加する。したがって、気泡崩壊時の衝撃波が噴流幅に及ぼす影響度は低いと言える。

4. 結言

- (1) キャビテーション崩壊時に生じる衝撃波は約 25kHz の周波数帯である。
- (2) 25 倍ノズルにおいてキャビテーション崩壊による衝撃波が噴流幅に影響を及ぼす影響は小さい。

参考文献

- (1) 玉木伸茂ほか，“ノズル噴孔内キャビテーションによる液体噴流の微粒化促進”，微粒化シンポジウム講演論文集，Vol.5，(2010)，pp.151-156。
- (2) 島章ほか，“圧縮性油圧作動油中の気泡の崩壊”，東北大学高速力学研究所報告，No.46，(1981)，pp.129-144。

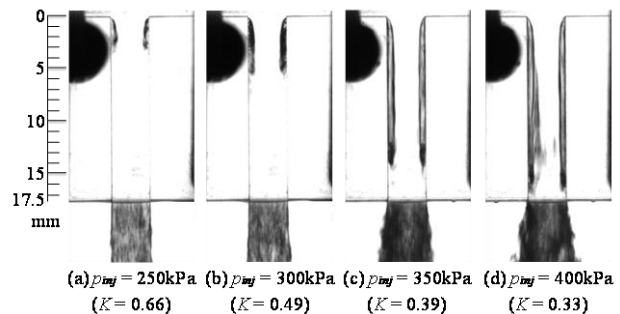


Fig.3. Images of the nozzle cavitation with each injection pressure

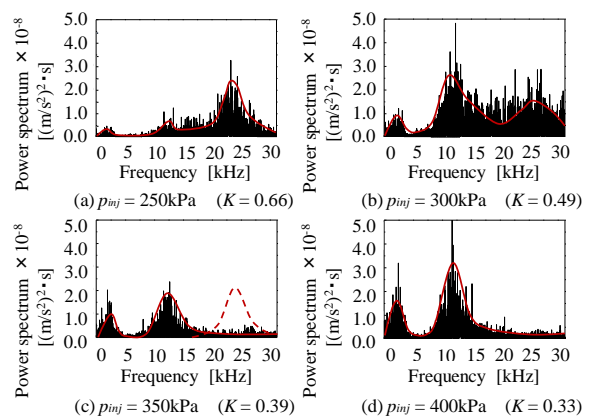


Fig.4. Results of the FFT analysis with each injection pressure

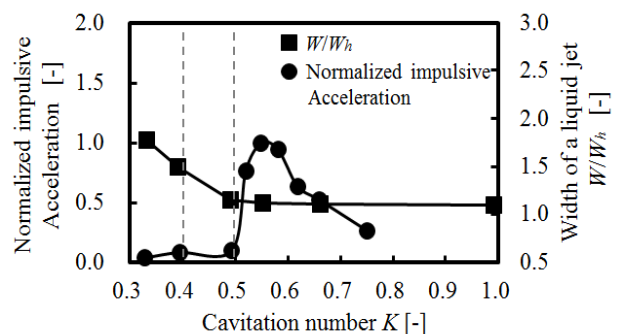


Fig.5. Results of the FFT analysis with each injection pressure