微小ノズルの発生ノイズに基づく キャビテーションの発達段階の判別*

横 田 源 弘** 伊 藤 幸 雄***
三 上 博 道** 望 月 敬 美****

Discrimination of Cavitation Development Stages in Very Small Nozzles Evaluated by the Noises

By Motohiro Yokota, Yukio Ito, Hiromichi Mikami, Hiromi Mochizuki

In order to find an effective method to discriminate the cavitation development stages, such as the subcavitating-, the transient- and the supercavitating stage, the cavitation noises and the cavitation aspects were measured in the internal flows through very small nozzles with various inlet shapes. It is shown that the noises in each stage are characterized by the peculiar behavior to able to discriminate the development stages.

1. 緒 言

ディーゼル機関用燃料噴射系あるいは油圧機器の高圧・高性能化に際しては、キャビテーションは絞り内部あるいは噴流周辺部に発生するため、絞り部あるいは噴流が衝突する壁面には非常に激しい壊食の発生が予想される。そのため、壊食の予測・軽減法の確立が急務となっている^{1), 2)}。

壊食、振動、性能低下などのキャビテーションを伴う諸障害は、通常、特定のキャビテーションの発達段階において生じる^{3)~5)}から、キャビテーションの発達段階を機器の外部から肉眼によらず検知できれば極めて有効である。そこで、ノイズによりキャビテーションを検出しようとする音響法がその点から注目される。

これまで、円筒絞りのキャビテーション・ノイズ（以下、単にノイズという）の特性に関する研究は数多くある^{6)~12)}が、ノズルの口径が1 mm以下の高速流れ場におけるノイズ特性との関連においてキャ

ビテーションの発達段階を論じたものはないようである。

よって本報では、微小ノズルにおけるキャビテーションの発達段階の判別を目的として、ノイズの挙動をキャビテーションの様相との関連において調べた。また、キャビテーションの発達段階を大幅に変えるために、入口形状の異なる三種類のノズルも用いた。その結果、ノイズの挙動がその発達段階に良く対応して変化し、発達段階の判別が可能であることなどを明らかにした。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置を示す。タンクに貯えられた水道水は三連プランジャーポンプで加圧され、高圧ホースにより測定部に導かれる。測定部の入口圧力 P_1 （スロート部入口より52D上流、Dは入口・出口側流路幅=2.1 mm）はリリーフ弁により、また、出口圧力 P_2 （スロート部出口より26D下流）はリリーフ弁とポペット弁とにより滑らかに変えられる。入口側水温 T_1 を一定に保つため、ヒーターおよび三方コックを設けている。キャビテーション係数 $\sigma \equiv P_2 / (P_1 - P_2)$ は P_1 を固定し、 P_2 を変えること

*原稿受付 平成5年3月11日

**正会員 水産大学校（下関市永田本町2-7-1）

***八戸工業大学（八戸市大字妙字大開88-1）

****正会員 東京水産大学（東京都港区港南4-5-1）

図1 実験装置

により変化させた。

キャビテーション・ノイズは水を満たした容器内に置かれた水中マイクロホン（受信周波数10Hz～50kHz）〔図2参照〕により測定した。ノイズのスペクトル分析はFFTアナライザによる。

キャビテーションの様相は、せん光時間1 μ sのクセノンランプによる瞬間写真により観察した。

図3には、3種の供試ノズル（ステンレス製）の形状と測定部を示す。供試ノズルにはスロート幅W

図2 ノイズ計測システム

が約0.5mmの矩形であり、入口に鋭角を持つシャープエッジ形（以下、直角形という）と凹面形ならびに楕円形の3種類である。ここで、楕円形ノズルを採用した理由は直角形や凹面形ノズルのスロート部に発生するはく離泡形キャビテーション¹⁵⁾の発生を抑制し、上流キャビテータ作用¹⁵⁾のある・なしにおいてキャビテーション・ノイズへの入口形状の影響を調べるためである。なお、測定部の詳細および供試ノズルの仕上げ状態は既報¹³⁾を参照されたい。

(a) 供試ノズルの形状

(b) 測定部

図3 供試ノズルの形状および測定部

キャビテーション係数 σ および流量係数 C_d は次のように定義した。

$$\sigma = (P_2 - P_v) / \Delta P \approx P_2 / \Delta P$$

$$C_d = M / A \sqrt{2 \rho_1 \Delta P}$$

ここで、 $\Delta P = P_1 - P_2$ 、 $A = Wh$ および M はそれぞれ静圧差、流路面積および質量流量、 W 、 h はスロート部の幅、奥行きである。また、 P_v 、 ρ_1 はそれぞれ水の飽和蒸気圧、密度である。添字 1, 2 はスロート部の入口、出口側を表す。

実験条件は、 $P_1 = 14.8 \text{ MPa}$ 、 $\sigma = 0.008 \sim 20$ 、スロート部平均流速 $V = 29 \sim 146 \text{ m/s}$ 、 $T_1 = 290 \sim 293 \text{ K}$ である。なお、試料水の空気含有度は実測していないが、飽和状態にあると見られる¹⁴⁾。

3. 実験結果

入口形状およびキャビテーション係数によってキャビテーションの様相が著しく異なること¹⁵⁾が知られているので、本研究が対象としたキャビテーションの発達段階¹³⁾をまず示しておこう。

すなわち、直角形および凹面形ノズルにおいては、はく離泡形キャビテーションが発生・発達するため、図4にははく離泡形キャビテーションの発達段階を示す。ここで、 λ と δ_{max} はそれぞれはく離泡形キャビテーションの発生領域の長さとその最大高さを示す。図中、 $(\sigma_d)_{SE}$ はそのキャビテーションの消

図4 はく離泡形キャビテーションの発達段階

図5 種々の入口形状における流量係数 C_d とキャビテーション係数 σ の関係

滅キャビテーション係数, σ_{cr} は臨界キャビテーション係数である. 図4より, λ と δ_{max} が σ によりあまり変化しないサブキャビテーション(以下, Sub.Cという)領域I, 増大するSub.C領域II, λ が1.3 Wから3 Wまで, δ_{max} が0.16 Wから0.22 Wまでそれぞれ急増するせん移領域III, そして, ゆっくり増大するスーパキャビテーション(SC)領域IVに分類される.

楕円形ノズルにおいては, はく離泡形キャビテーションは発生しないので, 流量係数 C_d とキャビテーションの様相の変化から発達段階を明示する. 図5には C_d - σ 関係を, また図6にはキャビテーションの様相を示す. なお, 直角形ノズルの場合も参考のために示した. ここで, $(\sigma_d)_{SH}$ は噴流せん断層中のキャビテーション(以下, 噴流キャビテーションと呼ぶ)¹⁵⁾の消滅キャビテーション係数である. また, C_d が σ の低下とともに減少し始める点(図5中の変折点)をブレイキキャビテーション係数 σ_B と定義した. なお, 領域IIIと領域IVの境界点が σ_{cr} (前述)に相当する. σ_B と σ_{cr} は同じ性質のもので, $\sigma < \sigma_B$ および $\sigma < \sigma_{cr}$ の領域においては, のど部内あるいは死水領域に空洞が発達し閉塞状態となっている(図6参照). したがって, 楕円形ノ

ズルにおけるキャビテーションの発達段階は σ_B を境界として大略2つの領域に分類される.

次に, ノイズを調べてみる. 図7には, ノイズの音圧レベルSPLと σ との関係を種々の入口形状について示す. 以下, SPL- σ 曲線をノイズ曲線と定義する. 図中, 直角形ノズルにおけるはく離泡形キャビテーションならびに楕円形ノズルにおける噴流キャビテーションの発達段階も参考までに示した.

これより, 直角形および凹面形ノズルの場合, SPLは大略2つのピークを持ち, 第1ピークははく離泡形キャビテーションが時間的に大幅にその発生領域を変化させる状態, また, 第2ピークは十分発達した噴流キャビテーション状態に対応している. すなわち, SPLは従来から言われているような単調なベル形曲線³⁾では表されず, 発生するキャビテーションの気泡の種類により一つまたはそれ以上のピークをもつ複雑な山形曲線を描く. これは, 衝撃パルスを測定した大場らの結果¹²⁾と一致する. また, 瞬間写真から予想されるように, SPLは臨界点 σ_{cr} および $(\sigma_d)_{SE}$ (あるいは初生キャビテーション係数 $(\sigma_i)_{SE}$)において著変する. すなわち, Sub.C領域Iにおいては, $(\sigma_i)_{SE}$ あるいは $(\sigma_d)_{SE}$ より σ が低下すると, SPLは徐々に増加し, Sub.C

図6 種々の入口形状におけるキャビテーションの様相

図7 種々の入口形状におけるノイズの音圧レベルSPLとキャビテーションの発達段階の関係

領域Ⅱに移る。Sub.C領域Ⅱにおいては、 σ の減少に伴う発生領域Ⅰの増大に応じてSPLは急増する。そして、スーパキャビテーションに向かうせん移領域Ⅲへの移行に伴いSPLは急激に低下する。 $\sigma < \sigma_{cr}$ のSC領域Ⅳにおいては、SC空洞後端からの気泡群の放出とそれらの発達により再び増大するが、死水領域に空洞が発達し閉塞状態になる $\sigma = 0.2$ 付近で第2ピークを形成し、減少する。なお、Sub.C領域Ⅱとせん移領域Ⅲの境界において第1ピークが現れ、せん移領域ⅢとSC領域Ⅳの境界($\sigma \cong \sigma_{cr}$)では極小となる。

これに対して、噴流キャビテーションのみが発生する楕円形ノズルにおいては、SPLは臨界点 σ_B および $(\sigma_d)_{SH}$ あるいは $(\sigma_r)_{SH}$ において著変し、 $\sigma = \sigma_B$ 付近にピークを持つ単調なベル形曲線を描く。

以上の結果、2種類のノズルのSPL特性は、それぞれの発達段階と良く符号している。また、ノズル形状の差異によってノイズ曲線は双峰型およびベル型(単峰型)となる。したがって、SPL特性の利用により、キャビテーションの発達段階の判別、および入口形状の推定が可能であることを示唆しよう。

次に、SPLの内容を明らかにするために、図8には直角形ノズルに発生するノイズのスペクトルをキャビテーションの発達段階ごとに整理した。これより直角形ノズルのスペクトルの特徴は次のようである。

領域Ⅰ： σ が変化しても、スペクトルは大略的に

は相似形を保っている。 $f < 18 \text{ kHz}$ においては、SPLのピークにおける周波数は領域Ⅱ～Ⅳに比べ

図8 直角形ノズルにおけるノイズのスペクトル

てわずかに現れる。

領域Ⅱ：キャビテーションの発生領域の長さ λ の増加とともに、 $f < 18\text{kHz}$ の低周波数成分は減衰するが、 $f > 18\text{kHz}$ の高周波成分は増大する傾向がある。

領域Ⅲ： λ が $1.3W$ から $3W$ （単一膜状空洞）に急増するこの領域では、 σ の低下（ λ の急増）とともにSPLは全周波数域にわたって著しく減衰する。

領域Ⅳ： $3\text{kHz} < f < 18\text{kHz}$ の低周波数成分は消滅し、 $f > 18\text{kHz}$ の高周波成分は再び増大した後低下する。

なお、凹面形ノズルにおいてもスペクトルを調べたが、その特徴は直角形ノズルと類似であったので省略する。

図9には、楕円形ノズルにおけるノイズのスペクトルを示すが、明らかに $\sigma \cong \sigma_B$ を境界としてスペクトルの性質は相反する傾向を示している。すなわち、 $\sigma_B < \sigma < (\sigma_d)_{SH}$ ：初生（あるいは消滅）近傍においては、著しいピークを示す成分は全周波数域にわたって卓越的に現れるが、噴流キャビテーションの発達とともに $f < 25\text{kHz}$ の低周波数成分は減少し、 $f > 25\text{kHz}$ の高周波成分は増大する。

$\sigma \leq \sigma_B$ ： $f < 25\text{kHz}$ の低周波数成分は σ の低下とともに一旦増大した後低下するが、 $f > 25\text{kHz}$ の高周波成分は減少する傾向がある。

図9 楕円形ノズルにおけるノイズのスペクトル

5. 結 言

微小ノズルにおけるキャビテーションの発達段階の判別を目的として、入口形状の異なる3種類のノズルを通る高速水流において、種々のタイプのキャビテーションが発生するノイズを介して、キャビテーションの発達段階を解明した。得たる結果を要約すると次のようになる。

- (1) キャビテーション・ノイズの音圧レベルSPLの変化は、キャビテーションの発達段階に良く符合する。また、各発達段階におけるノイズ・スペクトルも質・量的に差が生じる。したがって、ノイズを受信することによりキャビテーションの発達段階の判別が可能である。
- (2) ノイズは単調なベル形曲線では表されず、キャビテーションのタイプにより双峰型あるいは単峰型のノイズ曲線を呈する。

文 献

- 1) 熊谷, 日本機械学会第106回講習会教材, (1982-12), 93.
- 2) 渡辺ほか2名, 機論B, 55-515 (1989-4), 1.
- 3) Varga, J.J.ほか2名, Houille Blanche, 24-2 (1969), 137.
- 4) Knapp, R.T.ほか2名, Cavitation, (1970), 267, McGraw-Hill.
- 5) 大場・伊藤, 機論B, 39-323 (昭48-7), 2093.
- 6) Jorgensen, D.W., J. of the Acoustical Society of America, 33-10 (1961-10), 1334.
- 7) 稲熊ほか2名, 油圧と空気圧, 7-6 (昭51-11), 341.
- 8) 日比ほか2名, 油圧と空気圧, 15-7 (昭59-11), 545.
- 9) Oba, R.ほか2名, Trans. ASME, J. Fluid Eng., 104-1 (1982-3), 94.
- 10) 佐藤ほか4名, 機論B, 51-470 (昭60-10), 3285.
- 11) 大場ほか3名, 機論B, 52-476 (昭61-4), 1445.
- 12) 大場ほか4名, 機論B, 52-479 (昭61-7), 2511.
- 13) 横田ほか2名, 機論B, 55-515 (1989-7), 1817.
- 14) 沼知・椎名, 機論, 3-11 (昭12-5), 177.
- 15) 横田ほか2名, 機講論, No.918-1 (1991-3), 132.

~~~~~メッセージ~~~~~

横田源弘

三上博道

望月敬美

勤務先が異なる我々は、お互いにキャビテーションに興味を持ち、共同研究を行っている。

現在考えている研究内容は、近年機械工学の分野で広く使用されることが期待されているウォータージェット技術を、海洋や水産の分野で応用することである。