キャビテーション噴流の放出周波数の因子 Parameters of Shedding Frequency of Cavitating Jet

○ 西村 怜 (東北大[院]) 正 高桑 脩 (東北大[院])
正 祖山 均 (東北大)

Satoshi NISHIMURA, Tohoku University, 6-6-01 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579
Osamu TAKAKUWA, Tohoku University
Hitoshi SOYAMA, Tohoku University

Key Words : Cavitation, Jet, Image Processing, Fast Fourier Transform, Frequency

1. 緒 言

水中に高速水噴流を噴射して発生させたキャビテーション噴流(Cavitating Jet, CJ)は、ショットピーニングの如く材料の表面改質に応用することができる⁽¹⁾。CJの放出周波数は加工能力に影響を及ぼす⁽²⁾が、その影響因子は十分に明らかとなっていないため、本報ではCJの噴射圧力、周囲圧力およびノズル直径が放出周波数に及ぼす影響を明らかにした。

CJでは、渦キャビテーションが結合して生じた気泡雲が周期的に放出され、崩壊時に衝撃力を発生させる⁽³⁾。したがってCJの加工能力は、単位時間に崩壊する気泡雲の数、および個々の気泡雲の崩壊衝撃力すなわち大きさに依存すると考えられる。故に、CJの放出周波数、幅および流速によって定義されるストローハル数はCJの加工能力に関する考察を行う材料として適している。CJによる壊食試験では、アルミニウム試験片の質量損失が特定のノズル出口形状で極大となる機構がストローハル数の変化および最適値の存在により考察された⁽²⁾。しかしながら、噴射圧力、周囲圧力およびノズル直径など、流れの相似性がCJの放出周波数やストローハル数に及ぼす影響は明らかにされておらず、更なる検討が必要である。

本報では、高速度連続写真撮影および画像解析を用いてCJの放出周波数、幅および流速からストローハル数を導出し、CJの噴射圧力、周囲圧力およびノズル直径がストローハル数および放出周波数に及ぼす影響を明らかにした。

2. 実験装置および方法

図1には、本実験に使用したキャビテーション噴流試験装置の概略を示す。タンクに貯蔵した試料水は最大吐出し圧力35 MPa、最大吐出し量 $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ のプランジヤポンプによって加圧し、ノズルを介して試験部内に噴射した。CJの噴射圧力 p_1 は、プランジヤポンプの回転数を制御して調整した。また、CJの周囲圧力 p_2 は、試験部を密閉可能な構造とし、排水弁で試験部からの試料水の流出流量を制御して調整した。CJの支配因子はキャビテーション数 σ であり p_1 、 p_2 および試料水の飽和蒸気圧 p_v を用いて式(1)のように表される。

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{p_1 - p_2} \approx \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

CJでは $p_1 \gg p_2 \gg p_v$ であることから式(1)のように簡略化でき

Fig. 1 Cavitating jet apparatus

Table 1 Conditions of cavitating jet

Nozzle diameter d mm	0.4, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0
Injection pressure p_1 MPa	10, 15, 20, 25, 30
Ambient pressure p_2 MPa	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, p_σ

Fig. 2 Analysis point chosen as $10d$ at the jet center

る。本報では p_1 、 p_2 およびノズル直径 d を表1のように変化させ、CJを発生させた。なお、ノズル出口形状は既報を参考にして相似形とした。また、CJの加工能力は $\sigma = 0.014$ において極大となることから⁽¹⁾、各々の p_1 における $\sigma = 0.014$ となるような p_2 を p_σ とした。CJの様相は、試験部に設けられたアクリル製の窓から高速度ビデオカメラ(Motion Pro HS)を用いて撮影した。光源にはキセノンランプとハロゲンライトを使用し、カメラと同じ方向から光を入射させた。高速度ビデオカメラの設定は、フレームレートを20,000 fps、露出時間を $2 \mu\text{s}$ 、撮影時間を1 sとした。CJの放出周波数 f は、ビデオ中の解析点における白黒濃淡値の変動から求めた。図2に示すように、CJのポテンシャルコア領域を考慮して⁽²⁾、解析点は噴流軸上でノズルスロート下端から $10d$ となる点を選出した。グレースケール値の経時変化に対してフーリエ変換を施し、得られた周波数スペクトルのうち強度が高いものから順に20点を取り、それらの周波数の平均値を放出周波数 f として、表1に示す条件においてそれぞれの f を評価した。また、2,000フレーム分の写真を合成し、噴流軸に垂直な方向の白黒濃淡値の変曲点からCJの最大幅 w を求めた。

CJの無次元放出周波数であるストローハル数 St は、 f 、 w 、および噴流の流速 U を用いて式(2)のように定義した。

$$St = \frac{f \times w}{U} \quad (2)$$

U は p_1 、 p_2 、および試料水の密度 ρ を用いて式(3)のように表される。

$$U = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{2p_1}{\rho}} \quad (3)$$

3. 実験結果

図3にはノズル直径 $d = 1, 2 \text{ mm}$ におけるキャビテーション数 σ によるCJの幅 w とノズル直径 d の比、 w/d の変化を示す。 w/d は d によらず、ほぼ同一直線上にプロット点が存在することから、 $w \propto d$ となることがわかった。また、 σ が大なるほど w は減少し、その関係は最小二乗法により $w \propto \sigma^{-0.763}$ と得られた。これは、 σ が大なるほど気泡雲が発達しにくく、CJの幅が減少することを示している。

Fig. 3 Cavitating width of the jet varying with cavitation number

Fig. 4 Shedding frequency of cavitating jet varying with nozzle diameter ($p_1 = 20$ MPa)

図4には、CJの噴射圧力 $p_1 = 20$ MPaにおけるノズル直径 d と放出周波数 f の関係を示す。 d が大なるほど f が減少していることがわかる。一般に渦の発生を伴う非定常流れでは、渦の発生周波数、代表長さおよび流速によらずストローハル数が $St = 0.181$ の定数となることが非定常流れの相似則として知られている⁽⁴⁾。CJも渦の発生を伴う非定常流れであることから、CJの放出周波数がこの相似則に従うと仮定すると $St = \text{const}$ および式(2)より $f \propto d^{-1}$ が得られる。図4中の直線は $f \propto d^{-1}$ を表しており、実験結果の傾向と良好に一致する。

図5には、ノズル直径 $d = 1$ mmにおけるCJの噴射圧力 p_1 と放出周波数 f の関係を示す。 p_1 が大なるほど f は増大する傾向となった。また、前述のように $St = \text{const}$ および式(2)、(3)より、 $f \propto p_1^{0.5}$ が得られ、図5中の直線が示すように実験結果の傾向と良好に一致することが明らかになった。

図6には、ノズル直径 $d = 1$ mmにおけるキャビテーション数 σ と放出周波数 f の関係を示す。 σ が大なるほど f が増大していることがわかる。また、 $St = \text{const}$ 、式(2)および $w \propto \sigma^{-0.763}$ より得られる $f \propto \sigma^{0.763}$ の関係は、図6中の直線が示すように、実験結果の傾向と良好に一致する。

図7にはノズル直径 $d = 1, 2$ mmにおける、キャビテーション数 σ とストローハル数 St の関係を示す。図7からわかるように、 St は σ および d によらず、ほぼ $St = 0.18$ の一定値をとる。これは、Bearman⁽⁴⁾によって提唱された特性ストローハル数 $St = 0.181$ に極めて近い値であり、CJの放出周波数は非定常流れの相似則に従うことを示している。

以上の結果から、ノズルが相似形である限り、気泡雲の放出頻度はCJの噴射圧力、周囲圧力およびノズル直径に依存しない。このことから、ノズル周りの寸法が相似である限りCJの加工能力は噴射圧力およびノズル直径による噴流パワーの変化、およびキャビテーション数による個々の気泡雲の崩壊衝撃力の変化に直接依存すると考えられる。

Fig. 5 Shedding frequency of cavitating jet varying with upstream pressure ($d = 1$ mm)

Fig. 6 Shedding frequency of cavitating jet varying with cavitation number ($d = 1$ mm)

Fig. 7 Strouhal number varying with cavitation number

4. 結 言

本報では、高速度写真撮影および画像解析を用いて、噴射圧力、周囲圧力およびノズル直径がキャビテーション噴流の放出周波数に及ぼす影響を明らかにした。その結果、気泡雲の放出頻度を表すストローハル数 St は噴射圧力、周囲圧力およびノズル直径によらずほぼ $St = 0.18$ の一定値となり、放出周波数は非定常流れの相似則に従うことが明らかとなった。

参考文献

- (1) 祖山均, 材料, Vol. 47, No. 4, (1998), pp. 381-387.
- (2) H. Soyama, *J. Fluids Eng., Trans. ASME*, Vol. 133, No. 3, (2011), pp. 101301-1-11
- (3) H. Soyama and A. Lichtarowicz, 噴流工学, Vol. 13, No. 2, (1996), pp. 9-19.
- (4) P.W. Bearman, *J. Fluid Mech.* Vol. 28, (1967), pp. 625-641.