F224 超音速湿り蒸気流を用いた洗浄に関する研究

Study of washing by using supersonic wet steam

○ 非 小森 匠 (東京海洋大) 正 伊東 次衛 (東京海洋大) 非 井上 二三男 (東京海洋大)
正 刑部 真弘 (東京海洋大) 正 堀木 幸代 (東京海洋大)

Takumi KOMORI, Tsugue ITO, Fumio INOUE, Masahiro OSAKABE and Sachiyo HORIKI
Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 2-1-6, Koutou-ku, Tokyo 135-8533, Japan

Generally for biological and environmental safety, the de-oiling or cleaning should be done with the physical method instead of the chemical method using detergent or solvent. As one of the physical method, a cleaning by a supersonic steam flow impinging on machine parts was proposed. The simple de Laval nozzle to make the supersonic flow was designed and manufactured with the electric discharging machine. The impinging jet structure was carefully investigated by using air and steam. The under-expansion and super-saturation of jet is expected to increase cleaning ability. The cleaning experiment of oily machine parts and coins were conducted with the supersonic steam flow and the good results were obtained.

Key Words: De Laval nozzle, Supersonic wet steam, Under-expanded jet

1. 緒言

工業分野の製造過程において、洗浄という工程の重要性が高まっている。洗浄工程は切削、研削、プレス、曲げなどの前処理と加工、組立、表面処理、熱処理、接合などの後工程との間にあり、油分などの汚れを除去する。洗浄は製品に付加価値を与えない加工技術とも言われている。そのため、製品競争力の向上には洗浄工程の合理化を図り、洗浄にかかるコストを如何に下げるかを追求する必要がある。一方、地球環境にも配慮する必要がある。かつて工業分野の洗浄工程において、塩素系溶剤のトリクロロエチレンやオゾン層破壊物質であるCFC(chlorofluorocarbon)などを部品洗浄剤として使用していた。しかし、オゾン層保護に関する国際的な規制措置であるモントリオール議定書などを受け、現在では有害な塩素系溶剤やオゾン層破壊物質を使用しない洗浄方法を模索する企業も増えてきた。洗浄廃水の処理問題も発生するため、部品洗浄に用いた工業廃水を最小限に抑える事も、先に説明したコストミニマム化にも地球環境汚染防止にも繋がるのである。こうした課題を達成する為の洗浄方法の一つとして、ドラバルノズルを用いた超音速湿り蒸気洗浄法を提案する。工業用、家庭用にも導入されつつある高圧水洗浄機による洗浄法に比べて、蒸気を使用するため排水量は大幅に削減でき、洗剤剤を使用しないため、前述の背景を踏まえると検討の価値は十分にあると考えられる。また、更なるコストダウンのため、ドラバルノズルはレーザー加工ではなく、放電加工により製作された。低コストで製作できる分、ノズル内部はレーザー加工に比べてテーパ形状となるため、仕上げの際に手作業でノズル内部をヤスリがけしている。こうした製作過程がノズルに及ぼす影響がないか、圧縮空気基礎実験を行い検討した。その後、本ノズルを用いた簡易的な洗浄実験も行ったのでその一例を紹介する。

2. 実験装置及び方法

本実験で用いたドラバルノズルと実験装置を示す。

Fig.1 Drawings and picture of the de Laval nozzle

Fig.2 Experimental apparatus (Compressed air)

Fig.3 Experimental apparatus
(Supersonic wet steam washing)

(1) 圧縮空気実験

空気圧縮機により圧縮空気をタンクに溜め、コントロールバルブで圧力を調整した後、圧縮空気をノズルを通過させ大気放出する。このときの流量を測定する。ノズル入口圧力は、0.3MPa, 0.4MPa, 0.5MPa とした。また、Fig.2 にあるトラバース装置を用いて、ノズル噴流の圧力と温度を噴流方向に 0~30mm (1mm 毎), 30~50mm (2mm 毎), 75mm, 100mm と距離を変えて測定した。

(2) 蒸気洗浄実験

ボイラからの湿り蒸気をタンクに溜めた後、湿り蒸気をノズルを通過させて大気放出し、その噴流を用いて洗浄対象物を洗浄した。洗浄対象物諸プラスチック製と金属製のコインを用意した。ノズル入口圧力は 0.5MPa, 洗浄時間は 5s, 距離は 90mm とした。

3. 解析方法

(1) 圧縮空気実験

圧縮空気流量、ノズル入口温度、ノズル入口圧力の計測値を用いて放電加工による寸法誤差を考慮したノズル流路直径、ノズル流路断面積の導出を行う。ノズルのど部では臨界状態であるため、圧縮空気流量を臨界質量流量とし、縦軸を臨界質量流量、横軸を入口圧力としたグラフに実測値をプロットする。そして、寸法図におけるのど部流路直径において、各入口圧力に対する理論臨界質量流量を算出し、理論線を実測値と同じグラフに引く。また、理論臨界質量流量はのど部流路直径により異なるため、のど部流路直径の値を変えていくつかの理論線を同様に引き、実測値に最も近い理論線を見つける。このときの理論線の設定のど部流路直径が加工精度を考慮した実のど部流路直径となる。求めた実のど部流路直径とノズル出口の流路直径を用いて、連続の式より出口部無次元質量流量とのど部無次元質量流量を算出し、それらを無次元質量流量の理論線にプロットし、ノズルの噴流状態を確認する。

質量流量とは単位面積当たりの質量流量であり、臨界質量流量

はのど部における質量流量を表す。よって、理論臨界質量流量 W は臨界質量流量 G_a とのど部断面積 A_a の積で算出できる。

$$W = G_a A_a \text{ [kg/s]} \Leftrightarrow W = G_a A_a \times 60 \text{ [kg/min]} \quad (1)$$

G_a : 臨界質量流量[kg/(s・m²)]

A_a : のど部流路断面積[m²]

臨界質量流量 G_a は無次元臨界質量流量 G_a^* と入口圧力 P_0 、入口密度 ρ_0 を用いて次の様に表せる。

$$G_a = G_a^* \cdot \sqrt{P_0 \rho_0} \text{ [kg/(s・m}^2\text{)]} \quad (2)$$

P_0 : ノズル入口圧力[Pa]

ρ_0 : ノズル入口密度[kg/m³]

無次元臨界質量流量 G_a^* はのど部において臨界状態となった際の臨界圧力比 η_a と比熱比 κ により、以下のように表せる。また、作動流体が空気の場合、比熱比 κ を 1.4 とすることで定数として扱える。

$$\eta_a = \left[\frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 0.528 \quad (3)$$

κ : 比熱比(空気の場合 $\kappa = 1.4$)

$$G_a^* = \left[\kappa \eta_a^{1 + \frac{1}{\kappa}} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.685 \quad (4)$$

また、無次元化による解析を行い、圧力比の違いによる噴流状態の確認を行う。ノズルのど部とノズル出口に連続の式を適用し(5)が得られる。

$$\frac{A_1}{A_c} = \frac{G_a^*}{G_1^*} \Leftrightarrow G_1^* = \frac{A_c}{A_1} G_a^* \quad (5)$$

また、質量流量と質量流量の関係から(6)(7)が得られる。

$$A_c = \frac{W}{G_a} \quad (6)$$

$$G_a = \frac{W}{A_c} \quad (7)$$

さらに、質量流量と無次元質量流量の関係から(8)が得られる。

$$G_a^* = \frac{G_a}{\sqrt{P_0 \rho_0}} \quad (8)$$

最後に、(5)に(7)(8)を代入すると(9)が得られる。

$$G_1^* = \frac{W}{A_1 \sqrt{P_0 \rho_0}} \quad (9)$$

上式で求めたノズル出口無次元質量流量 G_1^* を無次元質量流量 G^* の理論式(10)に代入し、グラフ上から設計圧力比を読み取る。また、音速条件式を(11)に示す。

$$G^* = \left[2 \eta^{\frac{2}{\kappa}} \frac{1}{1 - \frac{1}{\kappa}} \left\{ 1 - \eta^{1 - \frac{1}{\kappa}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$G_a^* = \left[\kappa \eta_1^{1 + \frac{1}{\kappa}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

η_1 : 設計圧力比($\eta_1 = P_1/P_0$)

P_1 : ノズル出口圧力[Pa]

4. 実験結果及び考察

(1) 圧縮空気実験

Fig.4 に横軸に入口圧力、縦軸に臨界質量流量をとり、のど部

流路直径を求めたグラフを示す。図中におけるプロットは各入口圧力に対する臨界質量流量であり、実線、点線、破線はのど部直径を表中の各値に仮定した場合の理論臨界質量流量を示している。実測値がのど部流路直径を 3.86mm とした場合の臨界質量流量の理論線にあることから、放電加工で作製されたドラパルノズルの実のど部直径は 3.86mm であると言える。

Fig.4 The critical mass flow rate for the throat diameter

Fig.5には横軸に圧力比、縦軸に無次元質量流量をとり、式(10)、(11)から得られるそれぞれの理論線を引き、そこに実測値をノズル出口面積で無次元化したものをプロットすることで各圧力条件における噴流状態を推定する。実曲線はドラパルノズルの理論無次元質量流量を示しており、点線は音速条件式から得られる無次元質量流量を示している。実曲線と点線が交わるのはノズルのど部であるため、この時の流速は音速であることがわかる。また、先に求めたのど部流路直径より、このノズルの設計圧力比は 0.27 であり、大気放出時の入口圧力に変換すると 0.376MPa となる。つまり入口圧力 0.376MPa で噴流状態が遷移するということである。入口圧力 0.3MPa のデータは理論線の内側に位置して超過膨張を、入口圧力 0.4MPa、0.5MPa のデータは理論線の外側に位置しており不足膨張を示していることが Fig.5 から読み取れる。

Fig.5 Relation of non-dimension mass flux at the nozzle exit and the jet transition condition.

Fig.6 Relation of temperature drop and the amount of distance

Fig.7 Relation of total pressure and distance

Fig.8 Visualization of pressure fluctuations in the jet

Fig.6, Fig.7 には各入口圧力におけるノズル出口から噴流方向への距離に対する温度降下量と圧力変化を示した。噴流状態が不足膨張に遷移した入口圧力 0.4MPa、0.5MPa の時のデータは 0.3MPa のデータに対して各値の振れ幅が大きく、減衰するまでの距離が長く、Fig.7 では不足膨張と超過膨張では圧力変動の違いが顕著にみられる。Fig.8 にはノズル噴流に対して光源を当

て、空間中の光の明暗を写した写真と入口圧力 0.4MPa のときの圧力変動のデータを重ねて、空間中に生じる圧力変動の要因を捉えたことを示す。

(2) 蒸気洗浄実験

Fig.9 はノズルから蒸気を噴射させた直後の様子の写真である。ボイラで 0.4~0.6MPa 程度の蒸気を発生させた後に弁を全開とし、ノズルから大気放出する際の様子を簡単に述べる。(①)弁全開直後はボイラからの圧力状態のみがノズルに一気に伝わり、流量は伝達しない。(②, ③)その後流量が生じ、蒸気がノズルから放出され始める。(④, ⑤, ⑥)ノズル出口端においてボイラからの圧力状態を保ったまま蒸気が大気放出されたので蒸気噴流が急激に膨張を始める。(⑦, ⑧, ⑨)弁全開から時間が経つとノズル内部での圧力状態はノズル特性に従うため噴流の急激な膨張はなくなる。その後は(⑨)の状態で大気放出される。

Fig.9 Pictures immediately after steam jet

Fig.10 にプラスチック製コインの洗浄比較を示す。左が洗浄前、右が洗浄後である。入口蒸気圧力 0.5MPa、洗浄時間 5s、ノズルと対象物の距離 90mm とした。コインの汚れは手垢によるものが主だが、超音速湿り蒸気洗浄はこれに対して有効であったことがわかる。

Fig.10 Pictures of plastic coin washing comparison

Fig.11, Fig.12 には金属製コインの洗浄と洗浄評価を示す。洗浄条件はプラスチック製コインと同様とした。Fig.12 に示すようにコインの平面部分に対して有効な洗浄力があることがわかる。

Fig.11 Picture of metal coin washing

Fig.12 Picture of metal coin washing evaluation method

5. 結言

- (1) 放電加工で製作されたドラパルノズルの特性を把握するため基礎実験を行った。
- (2) 放電加工によるノズル製作過程において加工誤差が生じやすいと思われる、ノズルのど部の実際の寸法を圧縮空気実験により逆算することができた。
- (3) ノズルのど部の実際の寸法を逆算したことにより、ノズル噴流状態が遷移する入口圧力を求めることができた。
- (4) 圧縮空気実験において出口状態の測定と噴流の可視化を行ったことで、噴流中に空間的な圧力変動があることを確認した。
- (5) 蒸気洗浄実験において、蒸気噴射直後の様子を確認した。
- (6) プラスチック製、金属製のコインに対する洗浄実験では、超音速湿り蒸気洗浄の洗浄力が有効的である事を示した。
- (7) 噴流中の空間的な圧力変動が洗浄効果に与える影響を把握することを今後の課題とする。

6. 参考文献

- (1) 刑部真弘, ターボ動力工学, 海文堂(2001年3月)
- (2) 刑部真弘, エンジニアの流体力学, 朝倉書店(2010年12月)
- (3) 柳川敬太, 自動車部品における洗浄のニーズと当社の環境への取り組み, デンソーテクニカルレビューvol.14(2009年)
- (4) 松尾一泰, 圧縮性流体力学の基礎, 理工学社(2011年3月)
- (5) Ethirajan Rathakrishnan 他, 圧縮性流れの理論, 丸善株式会社(2008年6月)