G050065

コールドスプレー用超音速ノズル内の 流動状態に関する実験的研究

小岩 慎一郎^{*1}, 片野田 洋^{*2}, 福原 稔^{*2}

Experimental study on the flow conditions in the supersonic nozzle for cold spray

Shinichiro KOIWA^{*1}, Hiroshi KATANODA and Minoru FUKUHARA^{*1} Kagoshima Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Korimoto 1-21-40, Kagoshima-City, Kagoshima, 890-0065 Japan

Cold spray is a relatively new coating technology that produces deposits by high velocity impact of feed stock powders onto the substrate in order to impart corrosion resistance, abrasion resistance and so on. The purpose of this study is to clarify the flow conditions in the supersonic nozzle for cold spray. We measured the static pressure of the divergent nozzle using the pressure sensors attached to the nozzle. In addition, one-dimensional numerical analysis was performed, and was compared with the experimental result. As a result, the choked position in the experiment was found to be different from the one-dimensional analysis by the gasdynamic throat. Therefore, we calculated the position of the gasdynamic throat by the formula derived from theoretical analysis of quasi-one dimensional steady flow of insulation friction. However the error was negligible. Thus, the formula could not be used in this study. Assuming that there is the gasdynamic throat, the result of one-dimensional analysis was close to the experimental values.

Key Words : supersonic flow, cold spray, supersonic nozzle

1. 結 言

コールドスプレー（以下、CS）は、高速微粒子衝突による表面被覆技術の一つである⁽¹⁾。CS 法は、運動エネルギーを用いることで溶射粒子を熔融させることなく基材に付着させ、皮膜を形成することが可能である。皮膜を形成させるためには、粒子を臨界速度以上に加速させる必要があり、粒子をより加速させるノズルの開発が求められる。したがって、CS ノズル内の流動状態を明らかにする必要がある⁽²⁾。

本研究は、CS 用超音速ノズル内の流動状態を実験的に明らかにすることを目的とする。ノズル壁面に小型圧力センサーを取り付けた標準的な形状の CS ノズルを用いて、ノズル末広部における壁面静圧を測定する。さらに、ノズル末広部における圧力分布を一次元数値解析によって求め、実験値との比較を行う。

2. 実験装置及び方法

実験で用いたノズルの概略図を図 1 に示す。ノズルは一般的に CS で用いられる先細末広形状である。ノズル末広部長さは 180mm、ノズル先細部は 35mm、ノズル入口直径は 18mm、ノズル出口直径は 4mm、ノズルスロート直径は 1.84mm である。実験ではノズル末広部の壁面静圧を測定するため、ノズル軸に沿って一定間隔に圧力センサー取り付け穴及び直径約 0.05mm の静圧孔を設けた。圧力測定実験は、供給圧力 p_0 （以下、貯気圧）を 0.4～1.0MPa の範囲で 0.1MPa 刻みで増加させ、ノズル内の壁面静圧を測定した。

^{*1} 学生員, 鹿児島大学 大学院 理工学研究科

^{*2} 正員, 鹿児島大学 大学院 理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)
E-mail: k0413332@kadai.jp

Fig.1 Schematic diagram of the cold spray nozzle

3. 一次元数値解析

実験結果との比較のため、ノズル末広部における圧力分布を一次元数値解析によって求めた。用いた仮定を以下に示す。

- (1) 作動気体は半完全気体とする。
- (2) 貯気室からスロートまでは一次元定常等エントロピー流れとする。
- (3) スロートからノズル出口までは一次元定常摩擦流れとする。
- (4) ノズル内で剥離は生じない。
- (5) スロートでマッハ数 $M=1.0$ とする。
- (6) 解析範囲はノズル末広部のみとする。

一次元解析に用いた基礎式を以下に示す。式 (1) ～式 (3) をルンゲクッタ法によって解き、算出されたガス速度、密度、温度を用いて式 (4) からノズル内の静圧を求めた。解析条件を表 1 に示す。

$$\frac{du_g}{u_g} = \frac{u_g}{(M^2 - 1)A} \frac{dA}{dx} - \frac{u_g}{(M^2 - 1)} \left(\frac{\gamma M^2}{2} \frac{4f}{D_{pipe}} + \frac{\gamma - 1}{\gamma R T_g} \frac{\delta q_1}{dx} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_g}{dx} = -\rho_g \left(\frac{1}{u_g} \frac{du_g}{dx} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dT_g}{dx} = \frac{\gamma - 1}{\gamma R} \left(\frac{\delta q_1}{dx} - u_g \frac{du_g}{dx} \right) \quad (3)$$

$$p = \rho_g R T_g \quad (4)$$

ここで、 γ は気体の比熱比、 f はファニング摩擦係数である。

Table 1 Analytical conditions

Working gas	Air
Stagnation pressure	0.4 ~ 1.0MPa
Stagnation temperature	300K
Equivalent relative roughness	0.00133

4. 結果及び考察

貯気圧 $p_0=0.4\sim1.0\text{MPa}$ におけるノズルスロート ($x=0\text{mm}$) から出口 ($x=180\text{mm}$) までの壁面静圧の測定結果を図 2 (a) に示す。縦軸は圧力比 p/p_0 、横軸はスロート位置を原点とするノズル軸方向の距離 x である。図より、壁面静圧はノズル出口に向かって緩やかに減少していく傾向を示す。 p_0 の設定値に関わらず、その傾向は同じで

あった。したがって、ノズルスロート後方の流れは超音速流れである。また、ノズル出口付近 ($x=120\text{mm}$) より下流においては、静圧は減少傾向から一転して大気圧まで増加していく傾向を示す。これは超音速流れ特有の衝撃波の影響によるものである。なお、この衝撃波は p_0 が高くなるにつれて次第にノズル出口方向へと移動し、 $p_0=0.9, 1.0\text{MPa}$ ではノズル出口から排出されることが確認できる。

ノズル末広部における壁面静圧の一次元数値解析を行い、実験値と比較した結果を図 2 (b) に示す。図からわかるように、数値解析の結果と実験値にはノズル上流側で大きな誤差が生じた。この原因は実際の流れでは摩擦の影響を受けて気体力学的スロートができ、流れがチョークする位置がずれたためであると考えられる。一次元定常等エントロピー流れを仮定すると、流れがチョークするときの無次元圧力は $p/p_0=0.5283$ である。このことから、実験でチョークした位置を図から推定すると、ノズルスロート部の約 11mm 下流であることがわかる。この理由を調べるため、準一次元定常の断熱摩擦流れの理論解析から得られる式 (5) ⁹⁾ を用いて、気体力学的スロートの幾何学的なスロートからのずれを計算した。

$$\left[\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \right]_{M=1} = \frac{\gamma}{2} \left(\frac{4f}{D} \right) \quad (5)$$

ノズルスロートの曲率半径 r_c と流体力学的スロートの位置 Δx_{throat} の関係について、上式から計算した結果を図 3 に示す。著者らが用いたノズルは $r_c \approx 0$ である。したがって、管摩擦による幾何学的スロートからの気体力学的スロートのずれは無視できるといえる。しかしながら、実験では気体力学的スロートによりチョークする位置がずれたことから、気体力学的スロートができた理由は管摩擦ではないといえる。幾何学的スロートからの気体力学的スロートのずれの原因を解明するためには、更なる実験と考察が必要である。

気体力学的スロートが生じたと仮定して、再度一次元解析を行った結果を図 4 に示す。図より、壁面静圧分布の形状は実験結果に近い形状となることがわかった。また、細長い形状の CS ノズルのスロート部は層流である可能性が考えられ、壁面静圧が境界層の影響を受けやすいことから、ノズル先細部にサンドペーパーを取り付けて強制的にスロート流れを乱流にすることを試みた。その結果を図 4 中の ■ プロットで示す。サンドペーパーを取り付けた場合の結果は、取り付けない場合とほとんど変わらなかった。この理由として、サンドペーパーを取り付けた場所での流速が遅いことと、スロートまでの距離が短いことで流れが乱流に遷移しなかった可能性が考えられる。

5. 結 論

コールドスプレー用超音速ノズル内の流動状態を調べるために、ノズル内壁面静圧の測定実験を行った。さらに、先細末広ノズルに一般的に用いられる式による一次元解析の結果と実験結果を比較した。結論を以下に示す。

- (1) ノズル内壁面静圧は、スロート部からノズル出口にかけて、緩やかな減少傾向を示した。したがって、スロート部後方のノズル内流れは超音速流れである。
- (2) ノズル出口付近の下流方向への静圧分布は、それまでの減少傾向から一転して大気圧まで増加する。これは衝撃波の影響である。
- (3) 実験結果より、ノズル内において気体力学的スロートが生じた可能性が考えられる。しかし、準一次元定常の断熱摩擦流れの理論式により気体力学的スロートの発生を明確に示すことはできなかった。したがって、従来の準一次元定常の断熱摩擦流れの理論解析は、コールドスプレー用ノズルのような細長い超音速ノズルに適用できない可能性がある。
- (4) 幾何学的スロートの 11mm 下流に気体力学的スロートができたと仮定して再度一次元解析を行った結果は、実験結果に近づいた。

文 献

- (1) 榊和彦, “コールドスプレー/キネティックスプレーの概要と最新動向”, 機能材料 2009 年 7 月号, Vol. 29, No. 7, p 7.
- (2) 深沼博隆, “コールドスプレーの最新動向”, 溶射技術, Vol. 27, No. 3, pp. 24-25.
- (3) 松尾一泰, “圧縮性流体力学”, 理工学社 (1994), pp. 134-135.

Fig.2 Static pressure distribution in cold spray nozzle

Fig.3 Calculated distance from geometrical throat to gasdynamic throat

Fig.4 Comparison of static pressure distributions in the nozzle