

学位論文の要旨

氏名

森田 洋充

学位論文題目

コールドスプレーにおけるガス流動と粒子挙動に関する研究

本論文は、コールドスプレー（Cold Spray；以下、CS）装置の超音速ノズル開発プロセスにおけるノズル性能の実験的検証方法についてまとめたものである。

第1章では、まず、表面処理技術、溶射法、CSの概要について述べた。次にCSに関する従来の研究を詳細に述べた。具体的には、CSのガス流動に関する研究、粒子挙動に関する研究、粒子速度の計測に関する研究について、解明された点と未解決の問題点を述べた。章の最後には、本研究の目的および本論文の構成について述べた。

第2章では、CS装置の混合ガス温度を推定する手法として、気体力学的な計算に基づく方法と、ノズル外壁温度を用いる間接的推定方法について検討した。前者では、まず測定誤差が十分小さい質量流量、貯気温度、貯気圧からスロート断面積を求め、スロート断面積と貯気圧から混合ガス温度を推定する手法の妥当性について検証した。後者は、ノズル外壁温度測定実験およびCSノズルの伝熱計算により、ノズル外壁温度を用いた貯気温度の推算方法の妥当性について検証した。CSノズルの伝熱計算の結果より、ノズルスロート位置での外壁温度は、ノズルのスロート位置での全温度（混合ガス温度）にほぼ等しいことが示された。しかし、実験により測定されたスロート位置での外壁温度と混合ガス温度との差は、伝熱計算結果より大きくなる。この理由は、本伝熱計算による理論解析では、軸方向の熱伝導を考慮していないためであると考えられる。気体力学的な計算に基づき推定した混合ガス温度は、コイル状に巻いたシース熱電対により測定したノズル入口ガス

温度と良く一致する。本計算での両者の温度差は、最大4%程度である。

第3章では、赤外線カメラを用いて得られたCSノズル外壁温度の熱画像から、伝熱計算によりノズル内のガス温度、マッハ数、ガス速度、静圧を推定する方法について述べた。さらに、伝熱計算と、静圧測定実験、ノズル出口ピトー圧測定実験、準一次元数値解析の結果を比較し、本手法の妥当性を検証した。その結果、赤外線カメラを用いてノズル外壁温度を測定することにより、一部を除いて内部流れの定量的な診断が可能であることが示された。すなわち、ノズル内に衝撃波が存在しない場合、壁面静圧測定実験から求めたガスのマッハ数分布、温度、速度、静圧の分布は、層流境界層および乱流境界層を仮定した伝熱計算結果のガスのマッハ数、温度、速度、静圧の分布の範囲内に収まる。また、乱流境界層を仮定した場合の伝熱計算結果による出口マッハ数は、ピトー圧測定実験により得た出口断面平均のマッハ数、ガス温度、ガス速度とほぼ一致する。ノズル内に衝撃波が存在する場合、赤外線カメラで得られる画像から衝撃波の先頭位置や、その下流の定性的な静圧上昇を診断可能である。しかし、壁面静圧測定結果から求めた衝撃波下流のガスのマッハ数、温度、速度、静圧の分布は、層流境界層および乱流境界層を仮定した伝熱計算結果のガスのマッハ数、温度、速度、静圧の分布と異なる。これは、伝熱計算に用いている回復温度が剥離流れに適用できないことが原因であると考えられる。

第4章では、コールドスプレーにおいて、相互相関法により得られる粒子の速度と、それに対応する粉末の平均直径について、相互相関PIVの原理に基づいて一次元の粒子の流れを用いて考察した。作動ガスは窒素ガスとヘリウムガスの場合を考え、貯気圧2MPa、貯気温度300°Cとした。溶射粒子は球形の銅とし、対数正規分布を確立密度関数とする4つの直径分布を考えた。本研究では、特にノズル出口中心での粒子速度に着目した。総計8通りの解析結果について考察した結果、本研究の解析条件の範囲内では、相互相関法により得られる粒子の平均速度は、長さ基準と面積基準の平均直径の算術平均値の粒子速度

に概ね対応する。

第5章では、本論文の結論を総括した。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

A Study of Gas Dynamics and Particle Behavior in Cold Spray

Name: Morita Hiromitsu

This thesis describes the experimental validation of nozzle performance in the development process of converging-diverging Cold Spray (CS) nozzle. There are 5 chapters in this thesis.

Chapter 1 describes a brief explanation of surface finishing modification techniques, including thermal spray and CS. The detailed explanation about literatures of CS research is provided in this chapter. In literature review section, the study of gas dynamics, the particle behavior and the measurement of particle velocity are included. The objectives of this study are also described in this chapter.

Chapter 2 describes the investigation of the accuracy in estimating the stagnant temperature, total temperature, of CS gun, by calculating it based on 1) gas dynamics theory, and 2) outer-surface metal temperature, of CS gun. In the method 1), the cross-sectional area of the nozzle throat is obtained by highly accurate mass flow rate, stagnant temperature and stagnant pressure at room temperature of the process gas. Then, the mixing gas temperature of CS nozzle is obtained by the cross-sectional area of the nozzle throat and the stagnant gas pressure at elevated temperatures of the process gas. The mixing gas temperature calculated based on the gas dynamics theory is almost identical to the measured mixing gas temperature at the nozzle entrance. The maximum deviation of the calculated value to the measured one is 4%. From the consideration conducted by quasi one-dimensional calculation expressing in Chapter 3, the temperature difference of 4% affects the velocity of 10 μ m copper particle by around 1.6% at the nozzle exit. In the method 2), evaluated temperature gas was used for the measurement of outer-surface metal temperature and the heat transfer calculation of CS nozzle. From the heat transfer calculation result, the outer-surface metal temperature at nozzle throat becomes closest to the corresponding total temperature at the throat. However, the temperature difference between the outer-surface metal temperature and the total temperature at throat in the experiment is larger than the calculated result. This difference implies that heat transfer in the axial direction of the nozzle cannot be neglected in this calculation.

Chapter 3 described the method of estimating the axial distributions of the gas temperature, Mach number, gas velocity and static pressure in the CS nozzle using the outer surface metal temperature measurement using an infrared camera. In addition, the result obtained by this estimating method is compared with the results of the wall static pressure, Pitot pressure at the nozzle exit and quasi one-dimensional calculation. From the experimental results, it is shown that the proposed method can be used to diagnose the location of shock wave and following pressure rise in the nozzle from the outer surface metal temperature distributions. In the case of the gas flow without shockwave in the nozzle, experimentally obtained Mach number, gas temperature, gas velocity and static pressure lie within two curves obtained by heat transfer calculation with nozzle surface temperature, under the assumption of turbulent/laminar boundary layers in the nozzle. Mach number, gas temperature and gas velocity obtained by the heat transfer calculation under the assumption of turbulent boundary layer is almost identical to Mach number, gas temperature and gas velocity obtained averaged over the cross-sectional area obtained by Pitot pressure measured at the nozzle exit. In the case of the gas flow with a shockwave in the nozzle, the experimentally obtained Mach number, gas temperature, gas velocity and static pressure differ from the two curves obtained by the heat transfer calculation with nozzle surface temperature measurement, under the assumption of turbulent/laminar boundary layers in the nozzle. This is because the recovery factors for laminar/turbulent flow used in this heat transfer calculation cannot be applied to separated flows.

Chapter 4 aims to clarify the relationship between 1) mean particle velocity at the specific point in a flow field measured by cross-correlation Particle Image Velocimetry (PIV) and 2) corresponding mean particle diameter, using one-dimensional model in CS. Nitrogen and helium gases are selected as working gas in this calculation. The stagnant pressure and the stagnant

temperature are set at 2MPa and 300°C, respectively. The powder material selected is copper, and four distributions of particle diameter are given by lognormal distribution. Special attention is paid to the particle velocity at the nozzle exit center in this study. The calculated results show that the arithmetic mean value of length/area-averaged diameters provides the closest velocity, corresponding to the particle velocity obtained by the cross-correlation PIV method.

In Chapter 5, the results obtained in this study are summarized.