

平成 21 年 5 月 12 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19760121
 研究課題名 (和文) 衝撃波を伴う細長い超高耐磨耗コーティング用超音速ノズルの流動特性と最適条件の解明
 研究課題名 (英文) Investigation on the flow characteristics and optimization of small and long supersonic nozzle with shock waves for super wear-resistant coating
 研究代表者
 片野田 洋 (KATANODA HIROSHI)
 鹿児島大学・工学部・准教授
 研究者番号：40336946

研究成果の概要：

機械部品表面の硬度を高める新しい方法の 1 つとして、耐磨耗性を有する固体粉末を超音速気流により機械部品表面に吹き付けてコーティングを行う手法が注目を集めている。本研究では、超高耐磨耗コーティングを行うための超音速ノズルにおける気流の状態と固体粒子の速度について、主に数値シミュレーションにより調べた。研究の結果、ノズル形状およびノズルスロート上流のガス状態と固体粒子の速度との関係が明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：超音速流れ、圧縮性流れ、耐磨耗コーティング

1. 研究開始当初の背景

我国において機械部品の磨耗による経済損失は GNP の十数%に達する。この経済損失は材料の表面特性の改善で防ぐことができる。工業的に広く用いられている表面改質技術は、硬質クロームメッキ (Hard Chrome Plating, 以下 HCP) である。HCP は安価で高品質であるが、廃液による環境汚染やメッキ作業者の健康被害が深刻な社会問題となっている。HCP に代わる安全な耐磨耗コーティング技術として、溶射が注目されている。従来の溶射は、亜音速の燃焼ガス流により溶射粒子を加速・加熱して

固体表面 (基材) に吹付ける。この場合、2000℃以上のガス流により溶射粒子が酸化するため、コーティング (皮膜) の耐磨耗性は HCP に及ばない。近年、電気加熱した 900℃未満の不活性ガスの超音速流を用いる動的溶射が出現した。その皮膜は HCP より高い耐磨耗性を示す。理由は溶射粒子が高速で基材へ衝突するためであり、溶射粒子の更なる高速化が求められている。溶射粒子は気流により加速されるため、動的溶射では超音速ノズル内外の流動状態の理解が極めて重要となる。動的溶射の気体力学について、国外では米国とドイツの公

的機関が研究を行っているが、国内では2001年に動的溶射の研究を開始した研究代表者のみである。しかし、世界的にみて動的溶射の系統的な研究は行われていない。そのため、最適なノズル形状と作動条件は不明であり、ノズル形状、作動ガスの種類、貯気温度・圧力は装置メーカーごとに大きく異なるという問題がある。

2. 研究の目的

動的溶射は環境負荷が低く、かつ耐摩耗性に優れるため HCP 代替技術の最有力候補であるが、気体力学についての系統的な研究が行われていない。本研究の目的は、学術的な観点から動的溶射の気体力学について系統的に研究し、最適なノズル形状と作動条件を実験と数値シミュレーションにより明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、平成 19 年度は動的溶射ノズルの気体力学的特性を明らかにする実験に取り組んだ。実験パラメータはノズル形状（主にスロート直径）、ガス種（窒素、ヘリウム）、貯気圧（0.2~1 MPa）とした。作動ガスは窒素とヘリウムの混合ガスとした。作動ガスは特に加熱せず、貯気温度は常温とした。主ガスをヘリウム、混合ガスを窒素とした。貯気室、噴射室、混合室の圧力計測を行った。実験設備の都合上、溶射粒子の噴射は行わなかった。

平成 20 年度には、研究代表者が開発した非定常圧縮性乱流数値シミュレーションプログラムを用いて、計算による研究を行った。計算パラメータは、平成 19 年度の実験的研究と同様とした。流れは二次元軸対称と仮定し、乱流モデルには圧縮性を考慮した $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた。気体は比熱一定の理想気体とした。窒素とヘリウムは一樣に混合していると仮定した。気体の流れと溶射粒子は one-way coupling とし、溶射粒子の速度は流れを解いた後、ニュートンの運動方程式を 3 段階の Runge-Kutta 法で数値積分することで求めた。

4. 研究成果

本研究により得られた主な研究成果を以下に示す。本課題で取り組んだ研究は、これまで国内外で行われておらず、下記の成果は動的溶射を設計する上で有益な内容を数多く含んでいる。

(1) 主ガスの質量流量に対して混合ガスの質量流量を大きくするほど、混合室の圧力は増加する。この傾向は混合室ノズルのスロート直径が小さいほど顕著である。

(2) 主ガスの質量流量に対して混合ガスの質量流量を大きくするほど、主ガスのマッハ数

は減少し、噴射室出口のマッハ数は増加する。また、混合室ノズルのスロート直径が小さいほど2つのマッハ数は小さい。この知見は、圧力損失の小さい混合室を設計する上で必要不可欠である。

(3) 混合室の圧力は、一次元理論解析により定量的に予測可能である。この成果により、混合室の圧力が簡単な計算で予測できることが分かり、窒素とヘリウムの混合ガスを用いる動的溶射ノズルの設計が容易になる。

(4) スロート直径を1.75mm、出口直径を4.0mm、スロートからノズル出口までの軸方向長さを200mmとすることで直径10 μ mの銅粒子の速度を最大化できることが分かった。本研究ではスロートからノズル出口までの軸方向長さとして200mmまで計算を行ったが、この長さをさらに長くすることで溶射粒子の速度をより大きくできると考えられる。

(5) 窒素ガスに混合するヘリウムガスの割合を増やすほど粒子速度が大きくなることが分かった。これは、混合ガスの音速が大きくなることが主な原因であることが明らかになった。従来の実験的な研究により、窒素よりもヘリウムの方が溶射粒子をより加速できることは分かっていた。しかし、その物理的理由の詳細は不明であった。本研究成果は、ヘリウムガスがより溶射粒子を加速できる物理的理由を解明したもので、さらに溶射粒子を加速させるときに必要な知見である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- ① 福原稔, 池口昌宏, 藏ノ下昌平, 高本健太, 片野田洋, 飯野直子, 椎保幸, 吹き出し管を粉体層内へ挿入した場合の吸込みノズルの空気輸送特性に及ぼす挿入長さ比の影響, 粉体工学会誌, 第46巻, pp. 90-97, 2009, 査読有
- ② H. Katanoda, Numerical Simulation of Temperature Uniformity within Solid Particles in Cold Spray, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 2, pp. 58-69, 2008, 査読有
- ③ 片野田洋, 溶射技術者のための圧縮性流体力学 前編, 溶射技術, Vol. 27, pp. 63-68, 2008, 査読無
- ④ 片野田洋, 溶射技術者のための圧縮性流体力学 後編, 溶射技術, Vol. 28, pp. 52-58, 2008, 査読無
- ⑤ J. Kawakita, H. Katanoda, M. Watanabe, K. Yokoyama, S. Kuroda, Warm Spraying: An Improved Spray Process to Deposit Novel Coatings, Surface Coatings and

- Technology, Vol.202, pp.4369-4373, 2008, 査読有
- ⑥ S. Kuroda, J. Kawakita, M. Watanabe and H. Katanoda, Warm Spraying - A Novel Coating Process Based on High-Velocity Impact of Solid Particles, Science and Technology of Advanced Materials, Vol.9, pp.1-17, 2008, 査読有
- ⑦ 福原稔, 山内孝太, 片野田洋, 飯野直子, 亀田昭雄, 川越知明, 水力輸送特性に及ぼす排砂促進板の設置間隔および全長の影響, 可視化情報学会論文集, Vol. 28, pp. 62-68, 2008, 査読有
- ⑧ H. Katanoda, M. Fukuhara and N. Iino, Numerical Simulation on Impact Velocity of Ceramic Particles Propelled by Supersonic Nitrogen Gas Flow in Vacuum Chamber, Materials Transactions, Vol. 48, pp. 1463-1468, 2007, 査読有
- ⑨ 福原稔, 大牟礼智弘, 池口昌宏, 片野田洋, 飯野直子, 椎保幸, 吹出し管を備えた吸込みノズルの空気輸送特性に及ぼす管径比の影響, 粉体工学会誌, 44 巻, pp. 790-797, 2007, 査読有
- ⑩ H. Katanoda, M. Fukuhara and N. Iino, Numerical Study of Combination Parameters for Particle Impact Velocity and Temperature in Cold Spray, J. Thermal Spray Technology, Vol. 16, pp. 627-633, 2007, 査読有
- [学会発表] (計 19 件)
- ① 川邊裕一, 片野田洋, 福原稔, 低密度超音速噴流により加速される微粒子挙動の数値シミュレーション, 日本溶射協会第 88 回全国講演大会, 2008 年 12 月 11 日, 北九州
- ② 野畑将平, 片野田洋, 福原, 基材直前の衝撃波を考慮したコールドスプレーの一次元解析, 日本溶射協会第 88 回全国講演大会, 2008 年 12 月 11 日, 北九州
- ③ 桐明拓郎, 片野田洋, 福原稔, 橋本, 2 段高速フレーム溶射ガン内の混合に関する研究, 日本溶射協会第 88 回全国講演大会, 2008 年 12 月 11 日, 北九州
- ④ 橋本孝尚, 片野田洋, 福原稔, 桐明拓郎, 川喜多仁, 黒田聖治, 2 段高速フレーム溶射プロセスの一次元解析, 日本溶射協会第 88 回全国講演大会, 2008 年 12 月 11 日, 北九州
- ⑤ H. Katanoda, Numerical Simulation of Acceleration and Heating of Cold Sprayed Polymer Particles, 3rd Tsukuba International Coatings Symposium, Oct. 31, 2008, Tsukuba
- ⑥ H. Katanoda and M. Fukuhara, Numerical Study on Supersonic Impinging Jet from Cold Spray Nozzle, 12th Asian Congress on Fluid Mechanics, Aug. 20, 2008, Korea
- ⑦ H. Katanoda, J. Kawakita and S. Kuroda, Numerical Modeling of Warm Spray (Two-Stage HVOF) Process, International Thermal Spray Conference 2008, June 4, 2008, Maastricht
- ⑧ 新名巧, 片野田洋, 福原稔, 飯野直子, 桐明拓郎, 2 段高速フレーム溶射ガン内の高速流の混合に関する気体力学的研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス, 2007 年 11 月 23 日, 京都
- ⑨ 片野田洋, コールドスプレー粒子の温度の非一様性に与える粒子噴射位置の影響, 2007 年度溶射合同講演大会, 2007 年 11 月 19 日, 神戸
- ⑩ 川喜多仁, 小松誠幸, 片野田洋, 黒田聖治, ウォームスプレーにより熱劣化を抑制した不浸透性ポリエチレンコーティングの作成, 2007 年度溶射合同講演大会, 2007 年 11 月 19 日, 神戸
- ⑪ 大田慎介, 片野田洋, 福原稔, 飯野直子, 低密度音速噴流により加速される粒子速度のシミュレーション, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会講演会, 2007 年 11 月 17 日, 広島
- ⑫ 新名巧, 片野田洋, 福原稔, 飯野直子, 桐明拓郎, 2 段高速フレーム溶射ガン内の高速流の混合に関する基礎研究, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 2007 年 11 月 17 日, 広島
- ⑬ 片野田洋, コールドスプレーにおける粒子温度の一様性に関する数値シミュレーション, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス, 2007 年 10 月 25 日, 東京
- ⑭ 榊和彦, 片野田洋, 清水保雄, コールドスプレーの皮膜特性に及ぼすノズル長さの影響, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス, 2007 年 10 月 25 日, 東京
- ⑮ 山本秀樹, 片野田洋, 松尾一泰, 数値シミュレーションによる高速フレーム溶射ガンからの超音速噴流の可視化, 可視化情報シンポジウム, 2007 年 9 月 26 日, 岐阜
- ⑯ J. Kawakita, H. Katanoda, M. Watanabe, K. Yokoyama, T. Wu, S. Kuroda, Fabrication of Ti Coatings by an Improved Atmospheric Spray Process, Proc. 11th World Conference on Titanium, June 7, 2007, Kyoto
- ⑰ 片野田洋, 福原稔, 飯野直子, 減圧コールドスプレーにおける粒子の衝突速度に

関する考察, 日本溶射協会 2007 年度春季
全国講演大会, 2007 年 6 月 7 日, 大阪

- ⑱ H. Katanoda, M. Fukuhara and N. Iino,
Numerical Study of Combination
Parameters for Particle Impact
Velocity and Temperature in Cold Spray,
Proc. International Thermal Spray
Conference 2007, May 16, 2007, Beijing
- ⑲ J. Kawakita, M. Watanabe, S. Kuroda and
H. Katanoda, Densification of Ti
Coatings by Bi-modal Size Distribution
of Feedstock Powder during Warm
Spraying, Proc. International Thermal
Spray Conference 2007, May 16, 2007,
Beijing

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片野田 洋 (KATANODA HIROSHI)

鹿児島大学・工学部・准教授

研究者番号: 40336946

(2) 研究分担者

なし

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし

研究者番号: