

平成 22 年 5 月 18 日現在

研究種目： 若手研究 (B)  
 研究期間： 2008～2009  
 課題番号： 20760107  
 研究課題名 (和文) 先進マイクロ・ナノ粒子複雑流動プロセスのマルチスケール解析による最適化

研究課題名 (英文) Optimization of advanced micro/nano particulate complex flow process by multi-scale analysis

## 研究代表者

高奈 秀匡 (TAKANA HIDEMASA)  
 東北大学・流体科学研究所・講師  
 研究者番号：40375118

研究成果の概要 (和文) : マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工 (Cold Gas Dynamic Spray) に対して、微粒子超音速流動モデルと皮膜形成モデルから構成される統合モデルを構築した。衝撃波発生下でも微粒子静電加速により成膜効率が向上することや孔充填加工のための最適孔形状が数値計算により示され、先進的な研究成果が得られるとともに、本皮膜形成法の最先端応用ための基礎資料を提供した。

研究成果の概要 (英文) : In this study, the integrated model of particulate supersonic flow and coating formation for cold gas dynamic spray process is established. It was shown that electrostatic particle acceleration enhances the coating performance even under the presence of shockwave. Furthermore, the optimum cavity configuration was obtained by clarifying the influence of cavity configuration on coating formation. The fundamental data was obtained from this study for the advanced applications of cold as dynamic spray process.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：電磁流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：固気二相流，数値シミュレーション，静電加速，超音速流，皮膜形成

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロオーダーの粒子，または表面活性化されたナノ粒子をその融点よりも低い超

音速流中に注入し，加速された粒子が溶融することなく被加工物表面に高速で衝突することにより，微粒子が表面に付着・堆積し，

皮膜を形成することが 1980 年代に報告された。この皮膜形成法は、マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工 (Cold Gas Dynamic Spray) と呼ばれ、従来のプラズマ溶射等の方法に比べて省エネルギー型であるということから、革新的皮膜形成技術として国際的に注目されている。さらに近年では、粒子に活性化したハイドロキシアパタイト粒子を用いて歯質に高速で吹き付けることにより、粒子が歯質に付着し、失われた歯質が再構築することが報告されている。このように、これまで不可能であった歯質の再構築が低い投入エネルギーの下で可能となることから、マイクロ・ナノ粒子超音速ジェット加工の歯科医療への革新的応用展開が強く期待されている。これまでの研究から、材質および粒径に依存して、粒子が付着する最小の衝突速度 (臨界速度) が存在することが明らかとなっており、粒子の付着効率向上のためには、粒子を効率よく臨界速度以上に加速することが重要となる。

このような背景を踏まえて本研究では、高速気流と粒子との運動量交換による従来の粒子加速法に加え、コロナ放電により粒子を積極的に帯電させ、粒子を静電気力により加速する方法に着目し、システム全体に対してマルチスケール・マルチフィジクス統合解析を行い、最適作動条件を明らかにする。

## 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ・ナノ粒子超音速流動加工に対し、実験と数値計算との統合解析により、マイクロ・ナノ粒子混相流のフロント領域創成を目指し、静電気力を活用した先進マイクロ・ナノ粒子複雑流動プロセスの最適化を行い、本プロセスの産業、医療への革新的応用ならびに環境浄化への応用展開のための基礎資料を提供することを目的とする。さらに、微粒子超音速流動加工の先進歯科医療応用や構造物の欠陥補修、非熱接合などの本皮膜形成法の革新的応用を目指し、キャビティを有する基板へのキャビティ充填加工に対して実験・計算の統合解析を行い、キャビティに衝突する超音速微粒子流とキャビティとの複雑干渉現象を明らかにするとともに、最適キャビティ形を示す。

## 3. 研究の方法

固気混相流モデルおよび粒子のスプラット形成モデル、さらにはスプラット積層による皮膜形成モデルを統合したマルチスケール・マルチフィジクス統合解析を行い、粒子注入から皮膜創成までの全プロセスを再現することにより、システム全体の性能評価を行う。さらには、実機を用いた実験と計算との統合解析から解析モデルの妥当性を示すとともに、形状や作動条件の

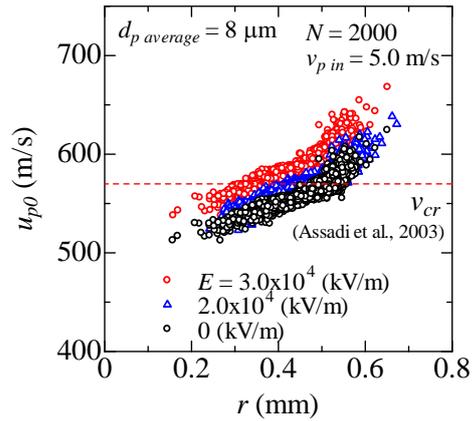


Fig. 1 Effect of electrostatic acceleration on particle impact velocity.

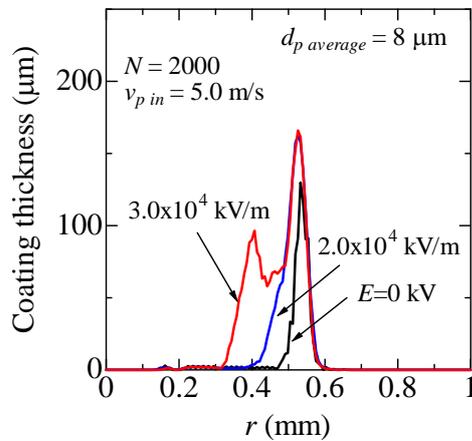


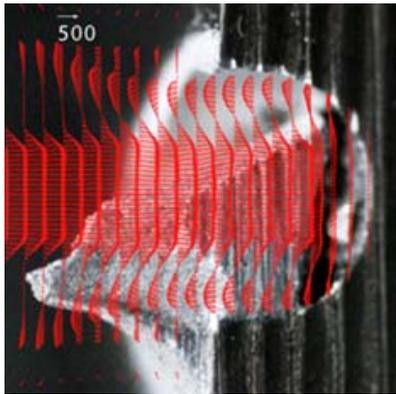
Fig. 2 Effect of electrostatic acceleration on coating formation.

最適化を行う。

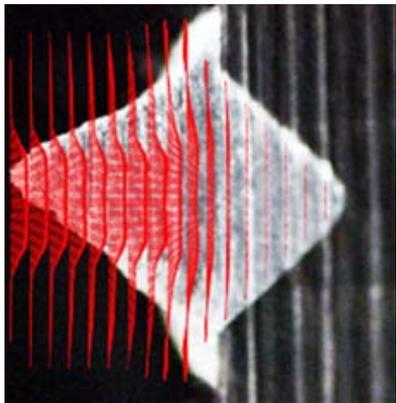
## 4. 研究成果

図 1 および 2 に粒子衝突速度および形成皮膜分布に対する静電加速効果をそれぞれ示す。これらの図より、従来の高速流との運動量交換のみの粒子加速に加え、静電気力を用いて省電力で帯電粒子を積極的に加速制御することにより、ナノ粒子高速輸送を可能とするとともに、粒子付着効率 (成膜効率) が著しく向上することが分かり、本研究により国際的に先進的な研究成果が得られた。

さらに、キャビティを有する基板へのキャビティ充填加工に対して解析を行い、キャビティを有する基板に衝突する超音速流中の微粒子と衝撃波との複雑干渉を解明するとともに、高速微粒子流の衝突過程を明らかにした。さらに、計算・実験の統合解析を行い、キャビティ形状が皮膜形成に与える影響を明らかにした上で最適キャビティ形状を示すことにより、微粒子超音速ジェット加工の先進応用ための基礎資料を提供



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Cross sectional photo of cavities after 20 seconds of spraying. (a) Spherical cavity and (b) cone-shape cavity.

した。

図 3(a)および(b)は、ノズル径の 1.5 倍のキャビティー径を有する球形キャビティーおよび円錐角 90 度の円錐形キャビティーに対し、実機を用いた 20 秒間の皮膜形成実験を行った後の基板断面写真をそれぞれ示したものである。なお、図中には実験と同条件の下で計算を行い、計算から得られた皮膜形成前の速度ベクトルもあわせて示した。実験より、球形キャビティーでは、キャビティー内に円錐状の皮膜が形成されることが明らかとなった。円錐形の皮膜が形成されるのは、図中に示した速度分布からもわかるように、キャビティー側壁近傍に強い逆流領域が現れ、この逆流領域により粒子が減速され、粒子がキャビティー外に排出されるためであると考えられる。一方、円錐形キャビティーを用いることにより、キャビティー側壁近傍における逆流は抑制され、キャビティーは完全に充填される。

本研究により得られた成果は世界的にも類を見ない大変独創的なものであり、本研究

成果により、最先端歯科医療応用、構造物の欠陥補修、非熱接合などの本プロセスの革新的応用展開に拍車がかかった。以上より、本研究成果は学術のみならず産業界にも大きく貢献するものと考えられる。

#### 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 4 件)

1. H. Takana, H-Y. Li, K. Ogawa, T. Kuriyagawa and H. Nishiyama, "Computational and Experimental Studies on Cavity Filling Process by Cold Gas Dynamic Spray", Journal of Fluids Engineering, Transactions of ASME, 査読有り, Vol.132, No.2, (2010), 021302 (9 pages).
2. 高奈秀匡, 水谷公一, 厨川常元, 西山秀哉, 「微小空間におけるナノ・マイクロ粒子ジェットの静電加速特性」, 査読有り, 日本機械学会論文集B編, Vol.75, No.753, (2009), pp.972-977.
3. H. Takana, K. Ogawa, T. Shoji, and H. Nishiyama, "Computational Simulation on Performance Enhancement of Cold Gas Dynamic Spray Processes With Electrostatic Assist", 査読有り, Journal of Fluids Engineering, Transactions of ASME, Vol.130, No.8, (2008), 081701 (7 pages).
4. H. Takana, K. Ogawa, T. Shoji and H. Nishiyama, "Computational Simulation of Cold Spray Process Assisted by Electrostatic Force", 査読有り, Powder Technology, Vol.185, (2008), pp.116-123.

[学会発表] (計 7 件)

1. 高奈秀匡, 「コールドスプレーによるキャビティー充填加工の計算・実験統合解析」, 日本溶射協会第 90 回 (2009 年度秋季) 全国講演大会・(社) 高温学会溶射部会 第 18 回溶射総合討論会, 2009 年 12 月 5 日, 豊橋.
2. H. Takana, "Computational and Experimental Studies on Supersonic Particulate Jet Process for Cavity Filling", 9th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Nov. 5th, 2009, Sendai, Japan.

3. H. Takana, “Computational and Experimental Studies on Cavity Filling Process by Cold Gas Dynamic Spray”, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Nov. 6th, 2008, Boston, USA.
4. H. Takana, “Control of Charged Nano/Micro Particle Behavior in an Impinging Supersonic Jet”, 14th International Congress on Plasma Physics (ICPP2008), Sep. 11th, 2008, Fukuoka, Japan.
5. 高奈秀匡, 「ナノ・マイクロ粒子ジェットとキャビティ基板との衝突干渉制御による超音速微粒子ジェット加工の高度化」, 日本流体力学会年会 2008, 2008年9月6日, 神戸.
6. 高奈秀匡, 「超音速微粒子ジェット加工におけるナノ・マイクロ粒子流とキャビティ基板との衝突干渉制御」, 日本混相流学会年会講演会 2008, 2008年8月8日, 会津.
7. 高奈秀匡, 「ナノ・マイクロ粒子高速流動の衝突過程とキャビティ充填加工の高度化」, 日本機械学会 2008 年次大会, 2008年8月4日, 横浜.

[その他]

ホームページ

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nishiyama-lab/japanese.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高奈 秀匡 (TAKANA HIDEMASA)

東北大学・流体科学研究所・講師

研究者番号 : 40375118