

氏名	たまき りょうじ <b>玉城 恵士</b>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第915号
学位授与の日付	平成31年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	<b>アーク溶射におけるノズル噴流の影響</b>
審査委員	(主査)准教授 山川勝史 教授 森西晃嗣 教授 西田秀利 准教授 田中満

### 論文内容の要旨

本論文は、材料の表面改質に関する重要なコーティング技術の一つであるアーク溶射について、その塗布工程のメカニズム解明と操作性の高い溶射制御方法の構築を行っている。一般的にコーティング材を何らかの方法で溶融し、吹き付けて皮膜を形成する溶射と呼ばれるものがある。屋外構造物などの防錆・防食用途や機械部品の機能性向上を目的としたこの溶射法は、その溶融方法の違いから燃焼ガス式溶射と電気式溶射に分類される。比較的溶射能力の高い電気式溶射において、高い溶融温度により多くの材料を利用できるプラズマ溶射に対し、その利用コストを1桁も下げることができるアーク溶射は産業界においても利用範囲が広い。しかしながら工学的価値の高いアーク溶射に対し学術的知見からアプローチされている例は少なく、現場レベルでの後追い改良が重ねられているのが現状である。実際、現場においては皮膜に発生する空洞や密着不足等様々な未解決の問題があり、溶射メカニズムの解明を通して抜本的な改良が求められている。

本研究の対象としているアーク溶射は2本の金属ワイヤに電圧をかけることでワイヤを溶融し、ノズルから噴出したアトマイジングガス(エア)を用いてその溶融された金属を被溶射物表面へ吹き付ける溶射法である。エアの状態(噴流現象)がアーク溶射に与える影響、つまりエアにより微細化される溶融粒子の状態のコントロールを如何に行うかが本技術の焦点となっており、操作性の高い溶融粒子微細化制御法を確立することを本研究目的としている。本研究を進めるにあたり、以下の検討を行った。

まず、ノズル出口から被溶射物間の基本的なエアの流れを把握するため、実験的手法により可視化を行った。一般的なエア可視化法であるタフト法や煙トレーサ法ではなく、噴流速度を勘案し高価ではあるが衝撃波まで可視化可能なシュリーレン法を採用した。本可視化システム構成上、実際に使用するノズルそのものではあるがワイヤに電圧を掛けない状態での可視化が必要であった。可視化システムの構築には多少手間取ったものの噴流の可視化は成功し、その結果ノズルから出た噴流が膨張・圧縮を繰り返し減衰する複雑な3次元構造であることを明らかにした。

続いてノズルカバー内電極部周りの複雑な流れ場を把握するためCFDによる可視化を試みた。これはシュリーレン法により明らかになった噴流構造をより明瞭な状態での把握も期待できるものである。そこでまず計算手法の妥当性を確認した。対象とする流れ場は細かな擾乱による実験毎のばらつきを抑え、且つ計算コスト抑制も踏まえてワイヤの無い単純なノズルを採用した。シ

ュリーレン法による同型ノズルの可視化結果との比較により CFD によるシミュレーション結果が噴流現象を良好に再現できたことから、計算手法の妥当性を確認した。また CFD によるケーススタディを効率的に実施するため、並列計算についての検証も行った。まずヘキサ要素とテトラ要素については後者の方が概ね 40% 程高速化できることを確認した。またテトラ要素についてより細かなメッシュほど計算効率が向上し、たとえ 400 近い演算コアを用いても理論値に対し 70% ほどのスケラビリティを達成した。

次に実際に使用するワイヤを取り付けたノズルに対し解析を行った。2 本のノズル先端における僅かな隙間において後方からの流れが圧縮される非常に複雑な流れ構造を生成した後、ノズルから流出エアが膨張・圧縮・減衰していることを明らかにした。また、ワイヤの取り付け方向による噴流幅や減衰パターンが明確に異なることもシミュレーションにより判明した。ワイヤに電圧を掛けた実溶射では溶融したワイヤ（溶融粒子）がこの噴流に乗って被溶射物へ吹き付けられ、この過程で溶融粒子はより微細化すると考えられる。この噴流状態が溶融粒子の微細化に関係があると考えられるため、アーク点上流の整流化と効率的な膨張波の発生がキー技術であると考え、2 本のワイヤ間にプレートを設置したスプリッターノズルを考案した。プレート設置によってプレート部で波（膨張波など）が発生し、その波のエネルギーによりアーク熱で溶融し引き千切られる際のワイヤサイズに変化を与えることを本ノズルでは期待している。CFD によりプレート部で膨張波が発生しノーマルノズルの噴流とは異なることを明らかにすると共に、プレート設置位置の変更でも噴流状態に違いが現れることを明らかにした。最後に、ハイスピードカメラによる可視化手法を構築し、実溶射時の溶融粒子の飛翔を解明することを試みた。本可視化から、ノーマルノズルではアーク熱でワイヤが溶融し、エアで吹き付けられる過程で微細化することを明らかにした。一方、スプリッターノズルでは、ノーマルノズルに比べアーク熱で溶融したワイヤのサイズが小さいことが判明し、プレートの設置位置の違いで上記ワイヤのサイズに変化が現れることも明らかにした。これら得られた知見から、“プレート設置の有無” や “プレートの設置位置変更” で溶融するワイヤのサイズを制御し、皮膜品質の制御ができる可能性があることを示した。

## 論文審査の結果の要旨

本論文はコーティング技術の一つであるアーク溶射について、その塗布メカニズムの解明と溶射制御方法の高性能化を目的として、実験的手法および数値計算の両方から課題解決に取り組んだものである。数千度の溶融材料を高速エアによる微細化・冷却・拡散制御を実施しながら塗布される本溶射工程は、流体力学的観点からも非常に複雑な現象と言える。申請者はまずシュリーレン法による可視化システムの構築からスタートさせ、この複雑な流体現象の捕獲を試みている。さらにより詳細に流れ場を把握するための計算流体力学による解析についても、計算手法の検証から始まり、高効率化のための並列手法に至るまで下準備を完全に整えた上で実施している。実験およびシミュレーションの結果より、ノズル中央に配置された両ワイヤの微小間隙に後方から衝突するエアがきっかけとなり、後流部において圧縮・膨張を繰り返しながら減衰する流れ場を明確に捉えることに成功している。またこの可視化結果を受け、申請者はノズルに流入するエアの挙動に着目しこの流れを分断・整流化させることで溶融材料の微細化や塗布状態をコントロールできると考え、プレートをワイヤ部に設置した新たなノズルを提案している。これはプレート

の大きさと設置位置によりエアの挙動を操作し、塗布制御の操作性を著しく向上させている。

このアーク溶射は（特許の関係上その用途を本要旨に記載できないが）日本のある基幹産業における重要な新規技術の一端を担っており、本研究の成果は産業界において多大な貢献を果たしたと言える。さらに本分野において学術的な視点から課題解決に取り組んだ姿勢は高く評価されるものであり、他の溶射方法についてもさらなる発展が期待できると考える。

本論文の基礎となっている学術論文は学術雑誌に掲載された2編と、査読制度の確立した国際会議の Proceedings に記載された1編であり、全て申請者が筆頭著者である。

1. R. Tamaki and M. Yamakawa, Study on the Nozzle Jet in Arc Spraying, *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol.37, No.12(2016), pp1394-1402
2. R. Tamaki and M. Yamakawa, Elucidation of Mechanism for Reducing Porosity in Electric Arc Spraying Through CFD, *Lecture Notes in Computer Science* 10860(2018), pp.418-428
3. R. Tamaki and Y. Imai and M. Yamakawa, Elucidation of Jet Phenomena in Electric Arc Spraying through CFD and Schlieren System, *Proceedings of The 29th International Symposium on Transport Phenomena* 2018