

コールドスプレー・アディティブマニュファクチャリングによる銅造形物の造形パターンおよび積層プロセスに及ぼす矩形断面ノズル末広部・平行部長さ比の影響

Effect of Ratio of Divergent to Parallel Section Length with Rectangular Cross Section Nozzle on Molding Pattern and Building up Process of Copper Objects by Cold Spray Additive Manufacturing

信州大学 (院) ○笹木 要, 山本 歩夢,

信州大学 (院) (現, 日本発条(株)) 金海 裕洋, 信州大学 榎 和彦

Kaname SASAKI (Graduate School, Shinshu Univ.), Ayumu YAMAMOTO (Graduate School, Shinshu Univ.),

Yasuhiro KANAUMI (Graduate School, Shinshu Univ. (Present affiliation, NHK SPRING Co., Ltd)),

Kazuhiko SAKAKI (Shinshu Univ.)

Mail address: 22w4036g@shinshu-u.ac.jp

1. 緒言

コールドスプレー (Cold Spray, 以下 CS) は, 先細末広ノズルを用いて供給粉末と供給粉末の融点より低温な高圧ガスを超音速に加速させ, 固相状態のまま基材に衝突させることにより成膜する技術である. CS は, 熱変質の少ない皮膜を形成し, 成膜速度が高く, 寸法制限が少ないといった特徴を持っている. これらの特徴を生かして, 積層造形技術 (アディティブマニュファクチャリング (以下, AM)) に加わる新たな方法として, CS による CSAM が注目されている.

一方で, CS の皮膜は, 管摩擦によるノズル管壁付近の粒子速度の低下やノズル中心部から端部にかけて粒子数が減少することにより, 中央部に向かってなだらかな山型となる. そのため, CSAM による造形物は, 特に円形断面ノズルを使用した場合に, 積層する毎にスプレー中心軸に対する造形物表面が鋭角化することで付着率が低下し, 造形物断面の三角形状が顕在化と報告されている¹⁾. また, 三角形状の造形物は特に側面および上部で気孔が多くなっており, 機械的性質の低下につながる. 三角形状化するノズルを用いて多方向から直方体造形物を作製した例があるが, 造形する方向を変えたことによって多くの気孔が発生し, 問題視されている²⁾.

本研究室の先行研究³⁾では, 上記の円形断面ノズルと異なる矩形断面ノズルで末広部長さ (以下, L_{div}) と平行部長さ (以下, L_{para}) の比が同じ先細末広平行部型ノズル (以下, 矩形断面ノズル, 図 1 参照) を短手(X)方向へトラバースすることにより比較的平坦な銅皮膜が得られた. そのため, 矩形断面ノズルを用いて一方向から積層することで造形物の三角形状化抑制の可能性が示された⁴⁾.

本研究では, 銅の造形パターンおよび積層プロセスに及ぼす矩形断面ノズルの末広部・平行部長さ比 (以下, $R_{Ldiv} (=L_{div} / (L_{div} + L_{para}))$) の影響の調査を目的とし, R_{Ldiv} の異なる三種類の矩形断面ノズル⁵⁾を用いて積層数毎の造形パターンを比較した. また, 矩形断面ノズル, 円形断面ノズルを用いて造形パターンを比較し, 造形物の三角形状化に関する考察を行った.

2. 実験方法

造形実験には本研究室で作製した CS 装置を使用した. 使用したノズルは, 図 1(a)に示す矩形断面ノズルと比較のため図 1(b)に示す円形断面ノズルで, 以下に使用した三種類の矩形断面ノズルの R_{Ldiv} と末広部半頂角 θ を示す.

(ア) $R_{Ldiv} = 0.3$ ($L_{div} = 60\text{mm}$, $L_{para} = 140\text{mm}$), $\theta = 7.4^\circ$

(イ) $R_{Ldiv} = 0.4$ ($L_{div} = 80\text{mm}$, $L_{para} = 120\text{mm}$), $\theta = 5.7^\circ$

(ウ) $R_{Ldiv} = 0.5$ ($L_{div} = 100\text{mm}$, $L_{para} = 100\text{mm}$), $\theta = 4.6^\circ$

矩形断面ノズルは全ての径 2mm, 出口部が 2mm×18mm で角部 R が 1mm である. CS 条件は, 作動ガスに窒素を使用し, ノズル入口部ガスの圧力, 温度をそれぞれ 3MPa, 553K とした. 溶射材料には純銅粉末 (福田箔粉工業(株)製, Cu-HWQ20 μm , D50=20.0 μm) を使用し, 粉末供給速度 73.3g/min で, ブラスト処理を行った純アルミニウム (A1100) 基材上に造形した.

皮膜, 造形物断面組織の観察にはデジタルマイクロスコープを用い, 造形パターンは三次元測定機 ((株)ミットヨ製, FALCIO-Apex776) を用いて 0.2mm 間隔で測定した.

3. 実験結果と考察

3.1 造形パターンおよび積層プロセスに及ぼす矩形断面ノズルの末広部・平行部長さ比の影響

図 2 に各矩形断面ノズルで作製した 1, 3, 5, 7, 9 パスの造形パターンを示す。矩形断面ノズルでは、 R_{Ldiv} が小さくなるにつれ上部中央が山型から谷型になっている。図示しないが CFD 解析によると R_{Ldiv} が小さい (θ が大きい) ほど、ノズル端部に向かうガス流速が高くなっており、粒子がノズル端部に分散しやすくなるため、 R_{Ldiv} を制御・最適化することで三角形化を抑制できると考える。ただし、 R_{Ldiv} が小さくなると作動ガスの流れがノズル内壁から剥離などして、粒子の衝突速度が低くなるため、溶射効率が低下する点も考慮する必要がある。

3.2 造形パターンに及ぼすノズル断面形状の影響

図 3(a) に円形断面ノズルを用いて 5 パス、(b) に $R_{Ldiv}=0.3$ の矩形断面ノズルを用いて 16 パス積層した造形物断面画像を示す。どちらも高さ 10mm を目標に造形した。また、図 3(c) は $R_{Ldiv}=0.3$ の矩形断面ノズルで 50 パス積層した。高さ 10mm 程度まで積層した場合、前項で述べたように円形断面ノズルは三角形状、 $R_{Ldiv}=0.3$ の矩形断面ノズルは上部が谷型の長方形に近い形状である。しかし、 $R_{Ldiv}=0.3$ の矩形断面ノズルでさらに積層すると、二段階の傾斜角度を持つ三角形状に成長していく結果となった。これは、CS では、スプレー角度に対する造形物側面の角度が 30° 以下であると成膜しない報告があり⁶⁾、その影響から矩形断面ノズルを用いた造形物側面に成膜せず三角形状に成長すると考える。

4. 結言

- (1) 矩形断面ノズルでは、 R_{Ldiv} を小さくすることで粒子をよりノズル端部に分散させることができるが、溶射効率が低下する。よって、目的に合わせて R_{Ldiv} をコントロールする必要がある。
- (2) 矩形断面ノズルでは、ある一定の高さまでは断面が幅広く長方形に近い形状を得られる。

謝 辞 銅粉末を提供いただいた福田金属箔粉工業(株)に感謝申し上げます。本研究の一部は競輪の補助を受けて実施しました。

文 献

- 1) D. Kotoban, et al., Surface & Coatings Technology, 309(2017), pp.951-958.
- 2) N. Hutasoit, et al., Int J Adv Manuf Technol, 110, (2020), pp.2341-2357.
- 3) K. Sakaki, et al., Proc.ITSC2017, (2017), pp.520-524.
- 4) 金海裕洋ほか, 日本機械学会 2022 年度年次大会講演論文集, (2022), No.22-1.
- 5) 山本歩夢, 笹木要ほか, 日本金属学会 2023 年秋季(第 173 回)講演大会, (2023), 152
- 6) C.-J. Li, et al., Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology, (2003), pp. 91-96.

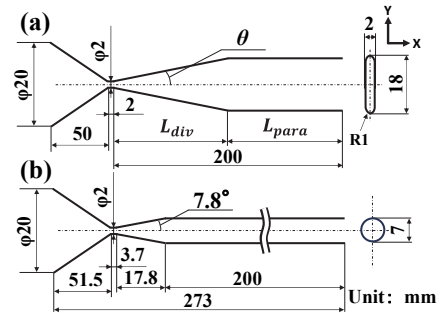


Fig.1 Schematic diagram of nozzle shape for (a) rectangular cross-section nozzle, (b) circular cross-section nozzle.

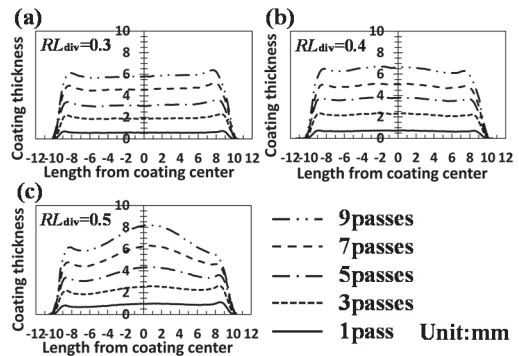


Fig.2 Coating thickness distribution measurement of the copper results by (a) traversing $R_{Ldiv}=0.3$, (b) traversing $R_{Ldiv}=0.4$, (c) traversing $R_{Ldiv}=0.5$.

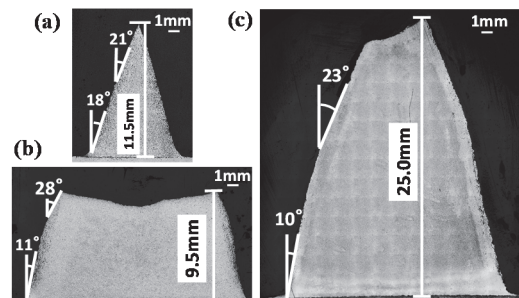


Fig.3 Cross sectional microscopic images of the copper moldings formed by (a) circular cross-section nozzle (5passes), (b) traversing $R_{Ldiv}=0.3$ nozzle (16passes), (c) traversing $R_{Ldiv}=0.3$ nozzle (50passes).