

# ワイヤ+アーク積層造形によるアルミ外装支持部材の実現可能性調査

山縣 侑加 佐川 隆之 仁田脇 雅史 青木 滋  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Feasibility Study of Aluminum Exterior Members by Wire Arc Additive Manufacturing

Yuka Yamagata, Takayuki Sagawa, Masashi Nitawaki and Shigeru Aoki

WAAM(Wire Arc Additive Manufacturing)の適用先としてアルミ外装支持部に着目した。外装支持部材に求められる(a)大型サイズ、(b)美観、(c)構造性能の実現可能性を確認するため、製造テストと静的加力試験を実施した。製造テストより、高さ方向のフィードバック制御、パーツ分割した造形と一体化、除去加工プロセスが大型部材製造に有効であること、美観向上にはブラスト処理とアルマイト処理が有効であることを確認した。静的加力試験より、造形物の変位や表面ひずみはFEM(Finite Element Method)解析で概ね評価できることを確認した。以上より、WAAMの適用・表面処理・FEM解析を行うことで要求される構造性能を満足するアルミ外装支持部材は実現可能であることが示された。

This study focuses on the application of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for aluminum exterior members. To assess the feasibility of meeting the requirements for aluminum exterior members, namely (a) large size, (b) aesthetics, and (c) structural performance, fabrication tests and a static loading test were conducted. The fabrication tests revealed that feedback control in the height direction, segmented fabrication and assembly, and subtractive process are effective for achieving large-sized components. Furthermore, blasting and anodizing processes were found to enhance aesthetics. The static loading test demonstrated that the displacement and surface strain of the fabricated components can be generally evaluated using FEM (Finite Element Method) analysis. These findings demonstrate that by employing WAAM, surface treatment, and FEM analysis, it is possible to realize aluminum exterior members that meet the required structural performance.

### 1. はじめに

コンピューショナルデザインの普及<sup>1)</sup>に伴い、造形可能な形状の自由度が高いAM(Additive Manufacturing)が建設業界で注目を集めている<sup>2)</sup>。建設部材の製造に使用される金属AM技術の中で、大型な部材を高速かつ安価に製造可能であるWAAM(Wire Arc Additive Manufacturing)に注目が集まっている<sup>3)~5)</sup>。WAAMは図-1に示すように、アーク放電で母材を溶かして熔融プールを形成し、そこにトーチから供給される金属ワイヤを順次溶かし込むことで生成されるビードを層状に堆積する技術である。WAAMによる建設部材の製造に着目した先行研究は主に鉄鋼による構造部材に焦点が当てられている<sup>6)~8)</sup>。一方当社では、外装材として頻りに用いられるアルミニウムに着目し、WAAMによる外装支持部材の実現可能性調査を進めてきた。高い意匠性が求められる建物

ファサードと造形可能な形状の自由度が高いAM技術は相性が良いと考えられる。図-2に当社における研究開発のロードマップを示す。2020年に基礎研究を開始し、小型かつ単純な形状の造形テストからスタートした。2021年には大型化と断面形状の複雑化を目標に、アルミ椅子を造形した。2023年にはさらなる大型化と実案件への適応を視野に入

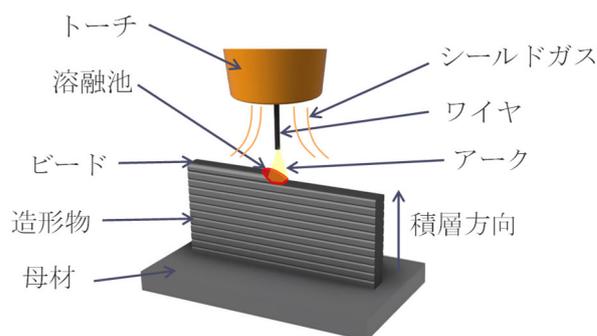


図-1 WAAMの模式図

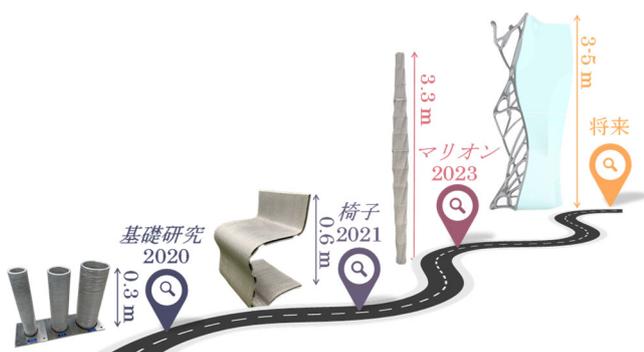


図-2 研究開発のロードマップ

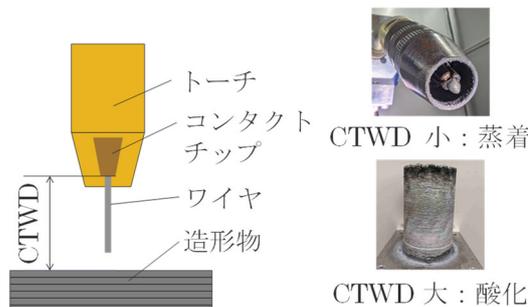


図-4 CTWD の定義と変動による問題



図-3 ファサードに WAAM による外装支持部材を適用するイメージ

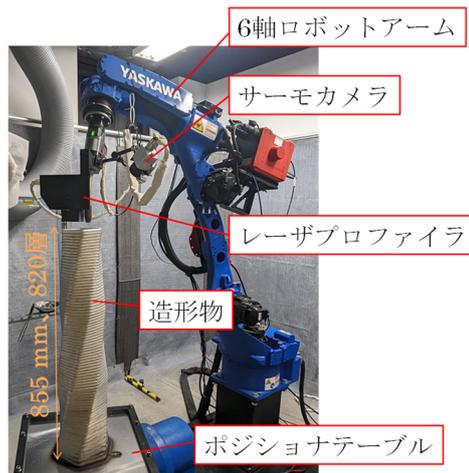


図-5 高さ方向のフィードバック制御に用いた造形装置

れ、アルミマリオンの造形を実施した。将来は図-2や図-3に示すように、より複雑な最適形状の造形を可能にするとともに3次元曲面ガラス技術と組み合わせて意匠性の高いファサードを実現することを検討している。当社の研究開発においては、外装支持部材の要件である(a)大型サイズ、(b)美観、(c)構造性能の3項目に着目し、WAAMによる実現可能性調査を実施してきた。以下では、3項目それぞれについて調査結果を報告する。

## 2. 大型サイズに関する検討

### 2.1 高さ方向のフィードバック制御

外装支持部材は3mから5mといった階高程度の長尺が必要であるため、WAAMの造形プロセスにおいて高くまで積層を継続する必要がある。しかし、アルミニウム合金は比較的融点が低く熱伝導率が高いため、ビード形状は積層中の温度変化による影響を受け変動しやすい。その結果、図-4に定義するコンタクトチップからワークまでの距離(CTWD: Contact Tip to Work Distance)が積層中に変動するという課題が生じる。CTWDが小さくなるとトーチとワークの蒸着、大きくなる

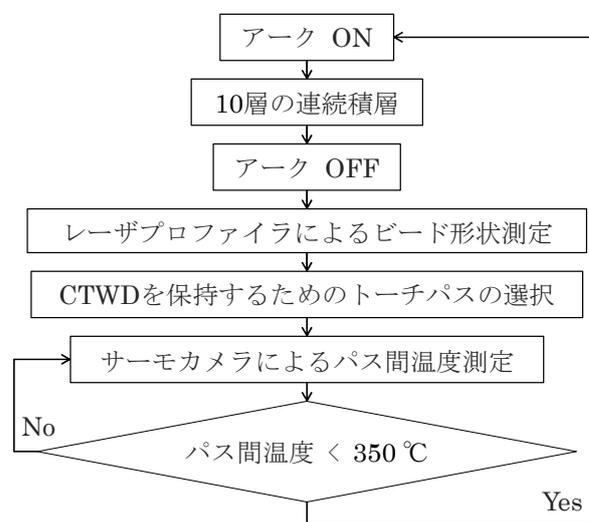


図-6 高さ方向のフィードバックを導入した制御フロー

とシールドガス不足による酸化の問題が生じ、積層の継続が困難となる。

造形中に CTWD が変動するという課題を解決するため、レーザプロファイラの測定データを用いた高さ方向のフィードバック制御を試行した。造形に用いた装置構成を図-5に、制御フローを図-6

に示す。造形装置は6軸ロボットアーム(安川電機製 MOTOPOS D-250F)、レーザプロファイラ(キーエンス製 LJ-X8080 および LJ-X8000A)、サーモカメラ (Optris 製 PI640i)を組み合わせた構成とした。造形では図-6 に示すように、あらかじめスライスしたパスに従って10層をフィードフォワード方式で連続積層した。この時の積層条件は表-1 に示すとおりである。10層の積層後、造形物の形状測定のために積層を一時停止した。積層を一時停止している間に、停止直前に積層された1層全周にわたるビードの断面形状をレーザプロファイラで測定した。ビード断面の測定結果から最上層におけるCTWDの平均誤差を算出し、あらかじめスライスされた積層パス群の中からCTWDの誤差を最小とする次の積層パスを選択し、積層再開層のパスとした。最後に、サーモカメラで積層再開点の温度を測定し、温度が閾値350℃を下回った時点で積層を再開した。以上を造形が完了するまで繰り返し、CTWDの精度を保持した。その結果、図-5 に示すとおり造形装置の可動域限界に近い高さ855mmの造形物の自動造形を達成した。よって、高さ方向のフィードバック制御は大型造形物の造形自動化に寄与することを確認した。

表-1 マリオンパーツの積層条件

パラメータ	値
材料	
ワイヤ / 母材	A5356 / A5052
アルゴンガス流量	25 L/min
溶接機設定	
1層目 / Pulse : ワイヤ送給速度	6.4 m/min
1層目 / Pulse : 電流	90 A
1層目 / Pulse : 電圧	13.2 V
2層目- / CMT : ワイヤ送給速度	6.0 m/min
2層目- / CMT : 電流	82 A
2層目- / CMT : 電圧	12.8 V
トーチ送り速度	
造形物高さ 0 - 90 mm	720 mm/min
造形物高さ 90 - 178 mm	720-1200 mm/min
造形物高さ 178 mm	1200 mm/min

## 2.2 パーツ分割した造形と一体化

一般に市販されているWAAMの造形装置はロボットの可動域に限界があり、造形可能なサイズは1m程度が限界である。よって、3mから5mの部材を実現するためには、分割して造形したパーツを後加工にて一体化する必要がある。

WAAMによるパーツごとの造形と後加工による一体化が可能であることを確認するため、一体化後の高さが3300mmのアルミマリオンを対象に手動溶接による接合を試行した。対象としたマリオンは図-7に示す形状で、一般的なマリオンとは異なり3次元のねじれを有する中空形状とした。まず、マリオンを高さ方向に4分割し、WAAMによるパーツの造形を行った。次に、造形したパーツに対して機械加工による上下の端面加工を実施した。この時の切断位置は造形パーツを3Dスキャナにより測定した結果を用いて、完成モデルに近い状態となるよう決定した。さらに、端部の開先加工を手作業にて実施した後、手動の一次溶接と仕上げ溶接により計3か所を接合してマリオンを一体化した。溶接はTIG溶接であり、造形パーツと同じくA5356アルミワイヤを用いた。

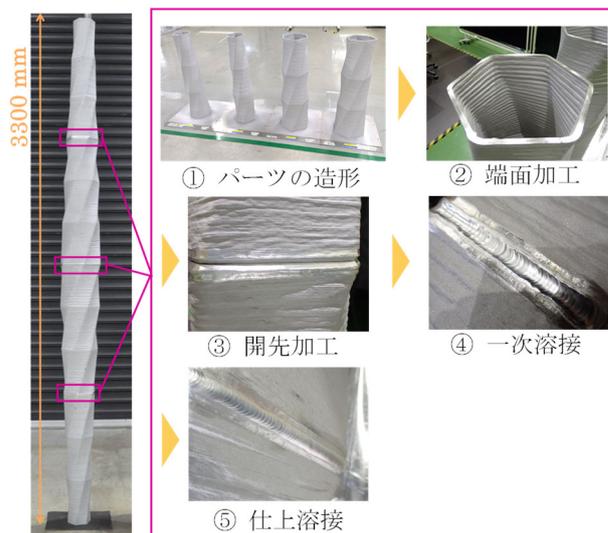


図-7 パーツの一体化手順

手動溶接した部分に対して蛍光浸透探傷検査を実施した結果、溶接部表面の欠陥はなく良好に接合できていた。一体化後のマリオンは全長3304.9mmであり4.9mmの誤差で仕上がった。WAAMによって製作された部材に関する管理基準は現状存在しないため、参考としてJASS14<sup>9)</sup>において定められているアルミニウム合金鋳物カーテンウォール製品許容差を例にとると、辺長3m以上の場合で±1/1000mmである。今回製作したアルミマリオンはこの基準に近い仕上がりであるため、現場適応も可能であると考えられる。しかし、現状の基準を超えているため、今後は製造時の精度を高めることや、WAAM特有の精度の悪さを考慮した基準作りが必要である。以上より、WAAMによるパーツの造形

と手動溶接による一体化で、建物の階高程度の部材が実現可能であることを確認した。

### 2.3 除去加工プロセス

積層開始・終了部分や1層の中でパスが重複する部分において、造形物高さが不均一となり段差が生じることがある。段差が生じると図-8に示すようにビードが不連続となる現象が起り、積層の継続が困難となることがある。

積層中に生じる段差の対処方法として、除去加工プロセスの導入を検討した。図-9に示す椅子を積層する際、ビード同士が側面で接合する部分(以下、接合部)においてビードの高さが周囲よりも高くなる傾向が見られ、積層の継続が困難となった。これは、接合部における積層パスどうしの距離が短いため、堆積された2つのビードがわずかに重なったことが原因と考えられる。そこで、図-10に示すように造形中に除去加工のプロセスを導入した。まずは6層をあらかじめ決められたパスに従ってフィードフォワード方式で積層した。この時の積層条件は表-2に示すとおりである。その後、研削加工により造形物最上面を平滑にした。特に図-9に示すような接合部において生じた段差を除去した。最後に造形物を1時間以上自然冷却し、造形部が室温と同等の温度となった後に積層を再開した。以上を繰り返し実施することで、積層中に段差が生じる造形物においても高さ420mmまで積層を継続することが可能であった。よって、大型造形においては造形物上面を平滑にする除去加工が有効であることが確認された。

### 3. 美観に関する検討

アルミニウムを用いたWAAMプロセスでは、他材料と比較して溶接時に酸化が発生しやすい<sup>10)</sup>。特にAl-Mg材料ではワイヤに含まれるMg元素がシールドガスの外側に露出し、酸化されることで造形物の表面にスマットと呼ばれる黒色の酸化物が付着することがある<sup>11)</sup>。これは、美観に悪影響を及ぼす。

スマットを除去し造形物の美観を形成するため、造形後の表面処理を試行した。実施した表面処理の手順を図-11に示す。造形物から母材を切断した後、ビードブラスト処理により造形物表面に付着したスマットを除去した。このプロセスによりアルミニウムの金属光沢が引き出された。その後アルマイト処理を実施し、造形物表面に色つきの



図-8 段差により生じたビードの不連続

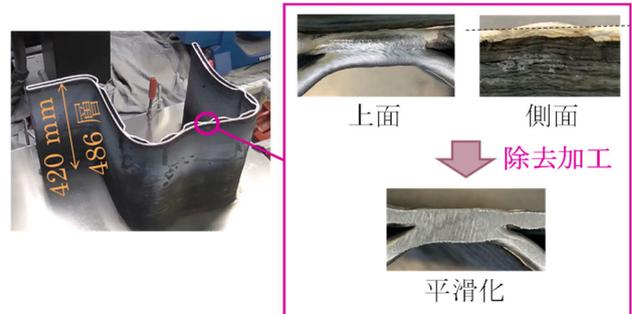


図-9 接合部における凹凸の発生

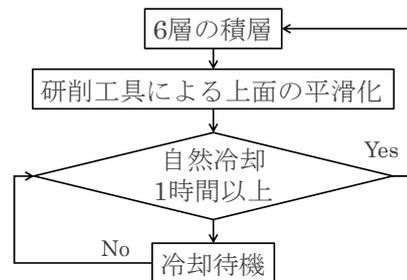


図-10 除去加工を導入した制御フロー

表-2 椅子の積層条件

パラメータ	値
材料	
ワイヤ / 母材	A5356 / A5052
アルゴンガス流量	18 L/min
溶接機設定	
CMT : ワイヤ送給速度	8.1 m/min
CMT : 電流	120 A
CMT : 電圧	14.8 V
ロボット設定	
トーチ送り速度	1800 mm/min



図-11 造形後の表面処理の手順

酸化被膜を生成した。WAAM に特有である造形物表面の凹凸があっても着色が可能であることを確認した。以上より、ブラスト処理とアルマイト処理が造形物の外観を調整する上で効果的であることが確認できた。

#### 4. 部材の構造性能に関する検討

WAAM で造形した部材の構造性能を評価するために、静的加力試験を実施した。加力試験のセットアップを図-12 に示す。椅子を対象とし、座面にプレート状のおもりを載せることで静的荷重を加え、その際の変位と表面ひずみを測定した。変位の測定にはモーショキャプチャシステムを使用し、椅子に取り付けた計 12 個のマーカの三次元変位を 0.1mm 程度の精度で測定した。表面ひずみの測定には 2 組の DIC(Digital Image Correlation)システムを使用し、椅子の脚の前面と背面の両側の表面ひずみを非接触で測定した。

図-13 に、100kgのおもりを椅子座面に積載したときの各マーカの z 方向変位を示す。FEM(Finite Element Method)解析値とモーショキャプチャによる測定値を比較すると、差の最大値はマーカ 2 において確認され、1.0mm であった。よって、解析と測定の差は全てのマーカにおいて小さく、変位について解析値と測定値がよく一致した。

図-14 に、100kgのおもりを椅子座面に積載したときの z 方向の表面ひずみを示す。カラーバーの最小値と最大値は、FEM 解析により求められた z 方向ひずみの最小値と最大値とした。カラーマップは FEM 解析値と測定値のいずれも縞模様となっており、接合部で大きな絶対値を示す傾向が一致していた。よって、表面ひずみについても解

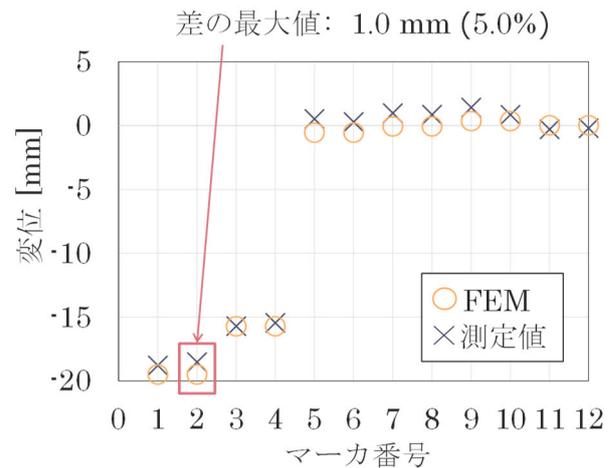
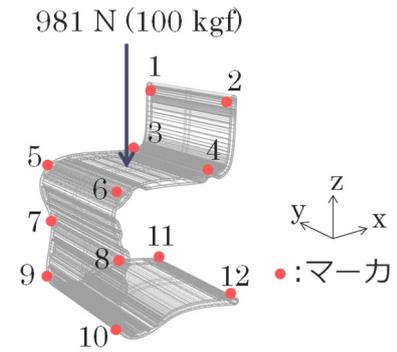


図-13 各マーカの配置および 100kg のおもり積載時の z 方向変位

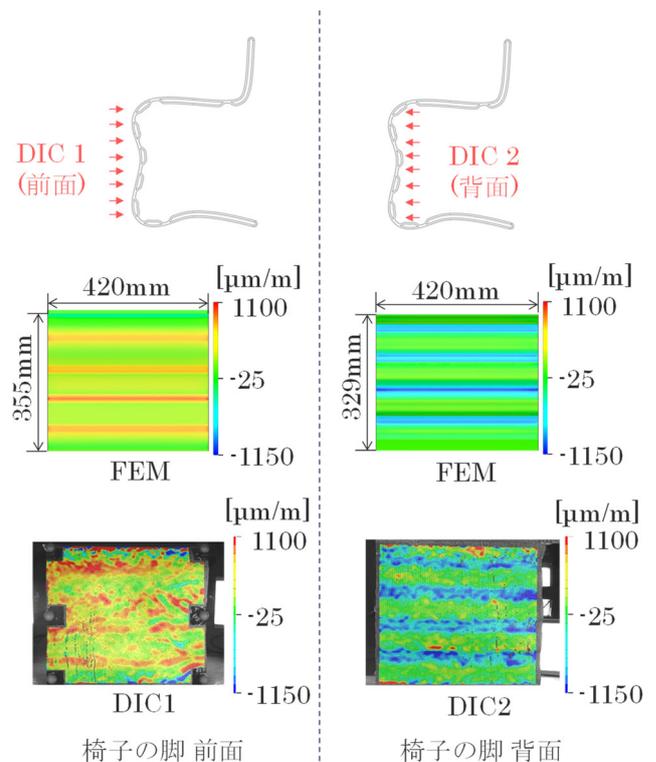


図-14 100kgのおもり積載時の z 方向の表面ひずみ

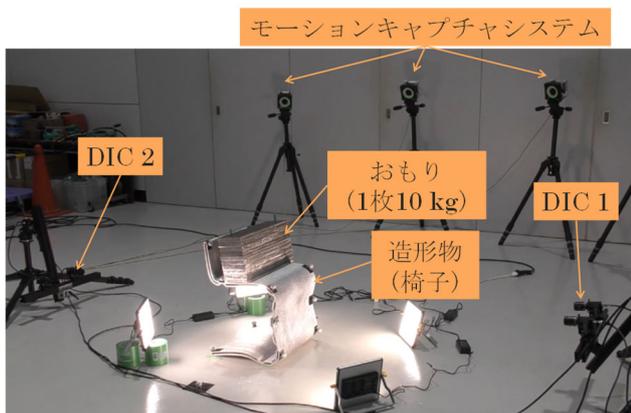


図-12 静的加力試験のセットアップ

析値と測定値がよく一致した。

以上の結果から、WAAM で造形した部材は FEM 解析により構造性能の評価が可能であることが確認できた。

## 5. おわりに

外装支持部材に求められる (a)大型サイズ、(b)美観、(c)構造性能の WAAM による実現可能性について検討するために、アルミマリオンおよびアルミ椅子を対象とした造形テストと静的加力試験を実施した。その結果、以下の知見を得た。

### (a) 大型サイズについて

- ・ 複数層ごとに積層高さを計測し CTWD を一定に保持する高さ方向のフィードバック制御は造形の大型化および自動化に有効である
- ・ WAAM によるパーツの造形と手動溶接による一体化で高さ 3m といった建物の階高程度の部材が製造可能である
- ・ 複数層ごとに除去加工で造形物上面の段差を平滑にする手法は造形の大型化に有効である

### (b) 美観について

- ・ ビーズブラスト処理とアルマイト処理により WAAM 造形物の美観を調整することが可能である

### (c) 構造性能について

- ・ WAAM で製作した部材は FEM 解析により構造性能の評価が可能である

以上より、WAAM の適用・表面処理・FEM 解析を行うことで外装支持部材に対して要求される構造性能を満足するアルミ外装支持部材は実現可能であることが示された。よって、WAAM は意匠性の高いファサードの実現に寄与する技術であると考えられるため、継続的な研究開発を進めていく。

## <参考文献>

1) I. Caetano, L. Santos and A. Leitão: “Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design”, *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 9, Issue. 2, pp. 287–300, 2020.

2) C. Bañón and F. Raspall: “3D printing architecture: workflows, applications, and trends”, Springer, 2021.

3) J. Pasco, Z. Lei and C. Aranas, Jr: “Additive manufacturing in off-Site construction: Review and future directions”, *Buildings*, Vol. 12, No. 53, 2022.

4) C. Buchanan and L. Gardner: “Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges”, *Engineering Structures*, Vol. 180, pp. 332–348, 2019.

5) J. Lange, T. Feucht and M. Erven: “3D-printing with steel - Additive manufacturing for connections and structures”, *Steel Construction*, Vol. 13, Issue. 3, pp. 144–153, 2020.

6) L. Gardner, P. Kyvelou, G. Herbert and C. Buchanan: “Testing and initial verification of the world’s first metal 3D printed bridge”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.172, 2020.

7) C. Huang, X. Meng, and L. Gardner: “Cross-sectional behaviour of wire arc additively manufactured tubular beams,” *Engineering Structures*, Vol. 272, 2022.

8) V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V. A. Girelli and T. Trombetti: “Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 167, 2020.

9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS14 カーテンウォール工事，2012.

10) B. Wu, Z. Pana, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu and J. Norrish: “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.35, pp.127-139, 2018.

11) Y. Sugiyama, J. Nakata, and H. Miyauchi: “Reducing smut in aluminium alloy welds using double wire MIG (DWM) welding”, *Welding International*, Vol. 7, Issue. 3, pp. 177-182, 2009.