

WAAM法における直流パルスMAG溶接プロセスを用いた 鋼構造物の高速積層造形技術に関する検討

井上, 雄介
九州大学大学院工学府船舶海洋工学専攻

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7392978>

出版情報 : Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
41, pp.823-828, 2025-11-17. 日本船舶海洋工学会

バージョン :

権利関係 : ©The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



WAAM法における直流パルスMAG溶接プロセスを用いた鋼構造物 の高速積層造形技術に関する検討

学生会員 井上 雄介 * 正会員 松田 和貴 **
正会員 後藤 浩二 **

Study on High-Speed Wire Arc Additive Manufacturing for Steel Structures Using the DC Pulse MAG Welding Process

by Yusuke Inoue *, *Student Member* Kazuki Matsuda **, *Member*
Koji Gotoh **, *Member*

Key Words: *Wire Arc Additive Manufacturing, GMAW, DC Pulse MAG, Weaving,
Microstructure*

要旨

近年、積層造形技術は急速に普及しており、造船業をはじめとする大型製品への適用が期待されている。本研究では、WAAM方式による金属積層造形において、大型鋼構造物の造形に向けて低コストかつ高速・高品質造形の実現を目的に、直流パルスMAG溶接電源を用いた検討を行った。その結果、ウィービングの適用が造形物形状の安定化および組織の均質化に有効であることを確認した。さらに、厚板構造物を対象とした実験では、最大7.0 kg/hの溶着速度においても内部欠陥のない造形が可能であることを確認した。一方で、溶着速度の増加に伴い、側面形状の悪化、組織の不均一化、および入熱増加による冷却時間の延長が課題として確認された。

*九州大学大学院工学府 船舶海洋工学専攻

**九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門

©日本船舶海洋工学会

1. 諸 言

ワイヤーク積層造形（Wire-Arc Additive Manufacturing; WAAM）方式による金属積層造形技術は、既存のアーク溶接技術を活用するものであり、他の積層造形方式と比較して、装置および材料の両面で低コストであるという特徴を有する。さらに、既存部品への形状付加が可能であること、母材とは異なる材料の適用が可能であること、造形可能寸法が大きく大型造形にも対応できることなどの利点から、船首・船尾部や艀装品といった比較的大型かつ曲面を有する製品への適用が期待されている。

近年では、ワイヤ送給を高度に制御することで低入熱かつ低スパッタ造形を可能とする CMT 方式等のワイヤ送給制御方式の溶接電源が増えている¹⁾。しかし、造船所で一般的に用いられる溶接機と比較すると導入コストが高い事が課題となる。一方、廉価かつ大溶着速度が可能な溶接プロセスとして CO₂溶接と MAG 溶接が挙げられる。著者らは事前に CO₂溶接による積層実験を実施したが、Fig. 1 に示すように、表面には黒色で剝離困難なスラグが残存することが確認され、後処理に多くの作業時間を要する上に、複雑な形状の造形を目的とする WAAM ではスラグ除去の自動化は困難な課題となると考えられた。また電流を増加させるとスパッタが増加すると共に大入熱により形状保持が困難になる等の高速造形実現には多くの課題が存在している。

本研究では、初期投資を抑制しつつ高速造形を実現することを目的として、廉価でありながらスパッタとスラグの発生抑制が期待できる直流パルス MAG 溶接プロセスを用いて積層造形の高速化に向けた基礎検討を実施した。



Fig. 1 Appearance of a wall with 120 layers deposited by CO₂ gas shielded arc welding.

2. 実験手法

2.1 供試材および実験条件

供試材は直径 1.2 mm のソリッドワイヤ SE-A50S（JIS Z3312 に規定される YGW15）であり、基板は板厚 9 mm の軟鋼 SS400（JIS G 3101）を用いた。供試ワイヤの溶着金属の機械的性質および化学成分を Table 1 に示す。積層試験の模式図を Fig. 2 に示す。アークトーチを垂直に設置し、基板の上に直線壁を 10 層積層した。シールドガスは Ar+20%CO₂ で、流量は 20 L/min とした。溶接電源は直流パルス MAG 溶接電源 P500L II（ダイヘン製）、溶接マニピュレータには Motoman 80 II（安川電機製）を使用した。また試験体温度が過度に上昇すると適切な積層が困難となるため、パス間温度（積層直前の試験体中央部表層温度）を 200℃ 以下に管理した。温度測定には放射温度計 FT-H40K（KEYENCE 製）を用いた。ただし設定放射率は先行研究²⁾を参考に 0.89 とした。実験条件を Table 2 に示す。A1～A3 は溶接速度の影響、B1～B2 はウィーピング適用の影響を調査することを目的とした。C1～C4 は、それらの知見を踏まえ、厚板構造物を想定した高速造形の実現を目的として実験を行った。

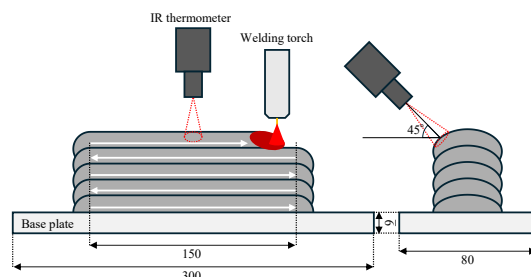


Fig. 2 Schematic illustration of deposition test. (unit: mm)

2.1 ビード形状計測

造形物の形状を評価するために形状測定器 LJ-V7000（KEYENCE 製）を使用し、各積層段階において試験体中央部の形状データを測定した。測定データを重ね合わせることで各層ごとの形状を評価した。

2.2 マクロおよびミクロ観察

積層造形試験にて得た試験体の中央を切断した後、鏡面研磨を実施した。その後、4%ナイトール液を使用して 15 秒間エッチングを実施した。マクロおよびミクロ観察にはマイクロスコープ VHX-6000（KEYENCE 製）を使用して観察した。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of deposited metal of weld wire.

	Chemical composition [mass %]					Mechanical property		
	C	Si	Mn	P	S	Y.S. [MPa]	T.S. [MPa]	El. [%]
SE-A50S	0.08	0.35	1.06	0.009	0.011	460	540	28

Table 2 Experimental conditions.

ID	Arc current [A]	Arc voltage [V]	Travel speed [cm/min]	Torch manipulation	Wire feed rate [m/min]	Deposition rate [kg/h]	Weight of deposited metal [g/cm]
A1	200	24.5	30	Stringer	6.7	3.6	2.0
A2			60	Stringer			1.0
A3			90	Stringer			0.7
B1	200	24.5	30	Stringer	6.7	3.6	2.0
B2				Weaving			
C1	200	24.5	15	Weaving	6.7	3.6	3.9
C2	250	26.0	20		8.5	4.5	
C3	300	28.0	25		11.0	5.9	
C4	350	31.0	30		13.2	7.0	

3. 実験結果

3.1 造形外観に及ぼす溶接速度の影響

積層外観の改善を目的に、Table 2 に示した条件 A1～A3 にて造形外観に及ぼす溶接速度の影響を調査した。

造形外観およびスキャンデータから作成した中央断面プロフィールをそれぞれ Fig. 3 と Fig. 4 に示す。まず、溶接速度 30 cm/min ではビードの垂れによる積層の左右振れが確認され、これは単位長さあたりの溶着金属量の過多が原因と考えられた。そこで速度を 60, 90 cm/min に変更して単位長さあたりの溶着量を減らしたが、速度の上昇に伴い造形外観は悪化し、各層の最高点位置も不安定となった。3～4 層目でビード端部が垂れる現象は、層を重ねる毎にビードが凸状となり形状維持の限界に達したためと考えられる。溶接速度を上げると逆にビードの凸化を助長し、より形状を悪化させる可能性がある。したがって、外観改善にはビードの扁平化が必要であると判断し、ウィービングの適用を検討した。

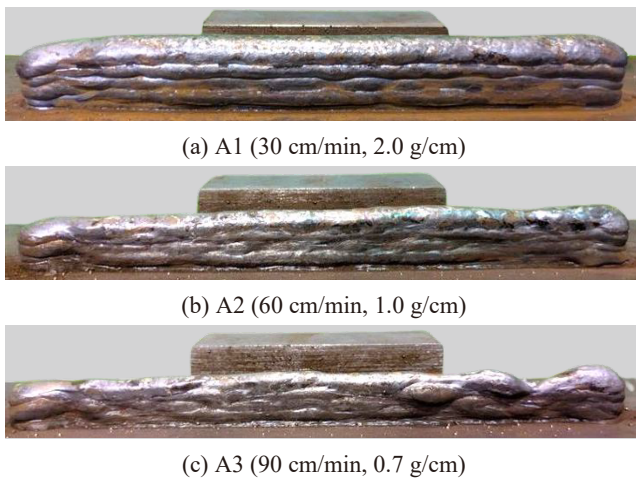


Fig. 3 Appearance of the additive manufacturing specimens.
(ID: A1 to A3)

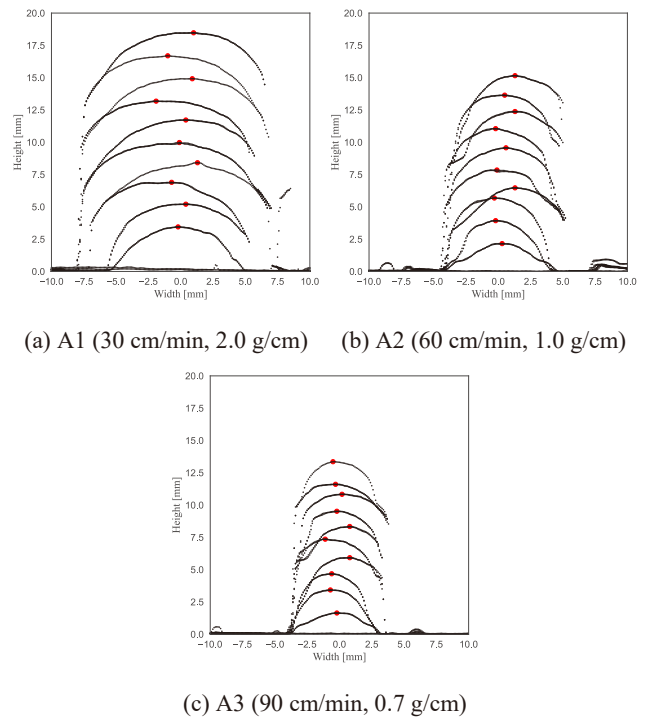


Fig. 4 Central cross-section from scanning data. (ID: A1 to A3)

3.2 造形外観、組織分布に及ぼすウィービングの影響

Fig. 5 に示す単振動ウィービングを使用する事でより扁平なビード形状を形成し、安定した積層造形を達成することを目的に、Table 2 に示した条件 B1, B2 にて実験を実施した。予備実験においてウィービングによる横移動を考慮したトーチ移動速度 v_w が過大な場合はハンピングが生じることを確認したため、試験条件 B2 におけるウィービング条件は安定して積層が実施できる振幅 5.0 mm, 周波数 1.0 Hz とした。

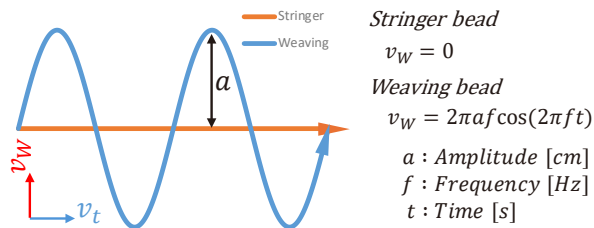


Fig. 5 Torch manipulation utilizing a weaving technique.

造形した試験体の外観写真を Fig. 6 に、中央断面プロファイルを図. 7 にそれぞれ示す。ウィービングの使用によりビード側面の凹凸が減少したことが確認できる。これは Fig. 7 より、ウィービングにより扁平なビードを形成することで、各層ビード最高点の左右ブレが大幅に減少し、端部の垂れが抑制されたためと考えられる。以上より、ウィービングを使用することで造形物の外観改善が可能な事を確認した。

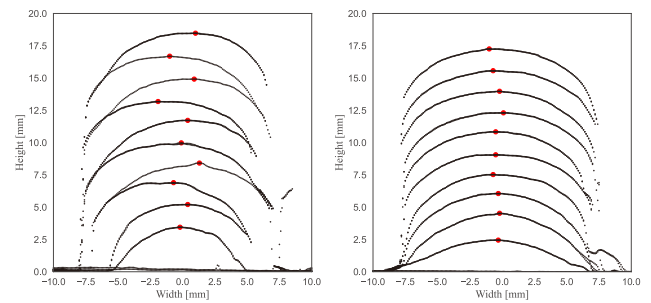


(a) B1 (Stringer)



(b) B2 (Weaving, 5 mm, 1 Hz)

Fig. 6 Appearance of the additive manufacturing specimens. (ID: B1, B2)

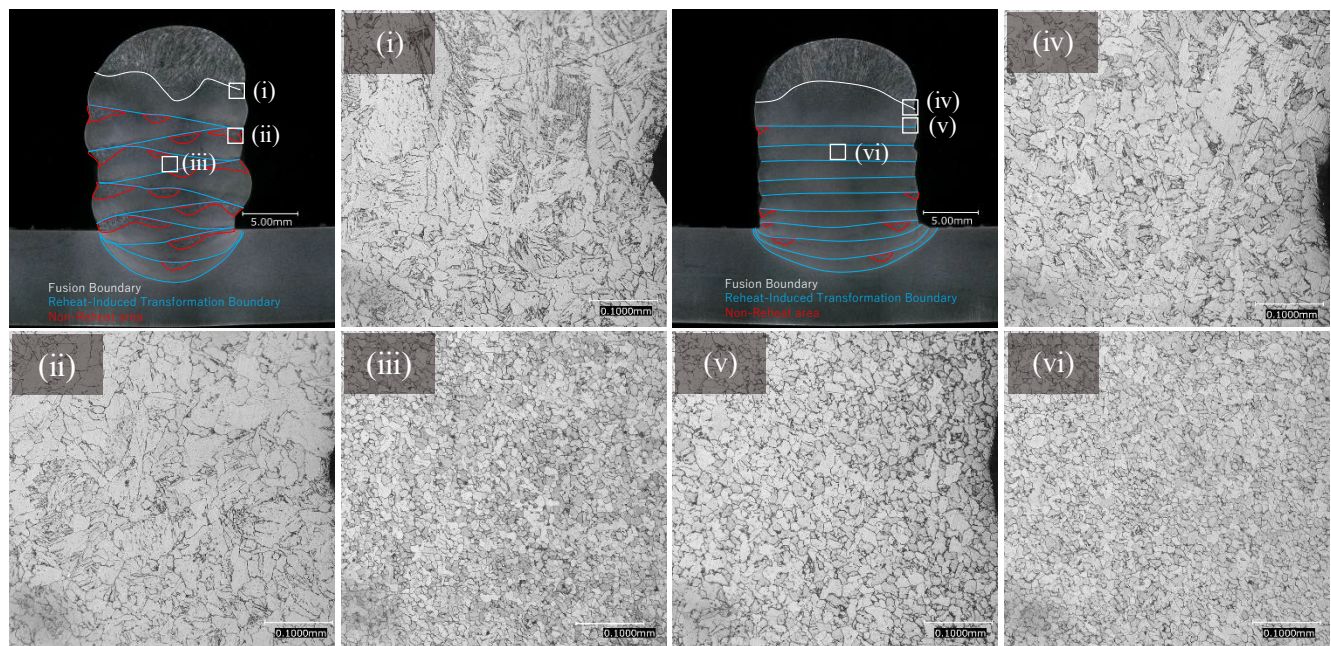


(a) B1 (Stringer)

(b) B2 (Weaving, 5mm, 1Hz)

Fig. 7 Cross-sectional shape at the center position along the length. (ID: B1, B2)

試験体中央部の断面観察写真を Fig. 8 に示すが、いずれの断面においても内部欠陥は確認できなかった。マイクロ観察ではウィービングの有無に応じてマイクロ組織に差が認められた。試験条件 B1 (ウィービング無) では赤線部で囲われた箇所 (ii) に粗大なフェライト組織が確認された。先行研究^{3,4)}では、後続の積層により変態点を超える熱履歴を経た領域 (青線部) までは再変態し、(iii) のような微細な塊状フェライト組織が得られると報告されているが、赤線で囲われた箇所 (ii) では再熱温度が変態点まで上昇せず、(i) の最上層と同じく積層ままのマイクロ組織が残存したためと考えられる。一方、試験条件 B2 (ウィービング有) では中央部 (vi) から端部 (v) まで均一に再熱範囲が広がり、全体的にマイクロ組織が微細化していた。結果的に、B2 では B1 と比べ最上層を除き粗大なフェライト組織が殆ど残存していないことが確認できる。



(a) B1 (Stringer)

(b) B2 (Weaving, 5 mm, 1 Hz)

Fig. 8 Cross-sectional observation results of deposited metal. (ID: B1, B2)

3.3 厚板構造物を対象とした高速造形検討

造船業界に使用される部材は厚板構造材が多いため、積層造形による部材を使用すると想定すれば厚みが 20 mm 程度の積層造形が要求される。中実構造や厚板構造材の場合は一層に数パス造形するケースが多いが⁵⁾、パス数が非常に多くなる結果として、融合不良や気孔欠陥などの欠陥が生じる確率が高い。また実際の積層ではパス間に冷却時間を設ける必要があり、パス数が増えると造形時間全体に占める冷却時間の割合が増えることが懸念される。本節では前章までの結果を踏まえて、厚さ 20 mm 程度の構造物製造を想定し、1 層 1 パスで高溶着速度での造形可能性を検討した。

Table 2 の実験条件 C1～C4 に示した 4 条件にて実験を実施した。単位長さあたりの溶着金属量を揃えるため、溶接電流および溶接速度を変化させた。ウィービング条件は事前検討より得た振幅 7.0 mm、周波数 0.5 Hz を使用した。

造形した試験体の外観を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、試験範囲内で最大電流値の 350 A 条件においても積層造形が可能であることを確認した。ワイヤ送給制御方式の溶接プロセスでは 5 kg/h 以下の造形速度が大半であるが⁵⁾、本実験では 7.0 kg/h でも良好に積層できることを確認した。一方、電流が増加するにつれ側面形状が悪化する傾向が確認できる。これは電流と共に溶接速度が上がることでウィービングの各振幅の間隔が広がったためと考えられる。しかし、ウィービング周波数を上げると振動中心において瞬間的な溶接速度が過大になり積層が不安定になるため、ウィービング条件は適切に調整する必要があると考えられる。

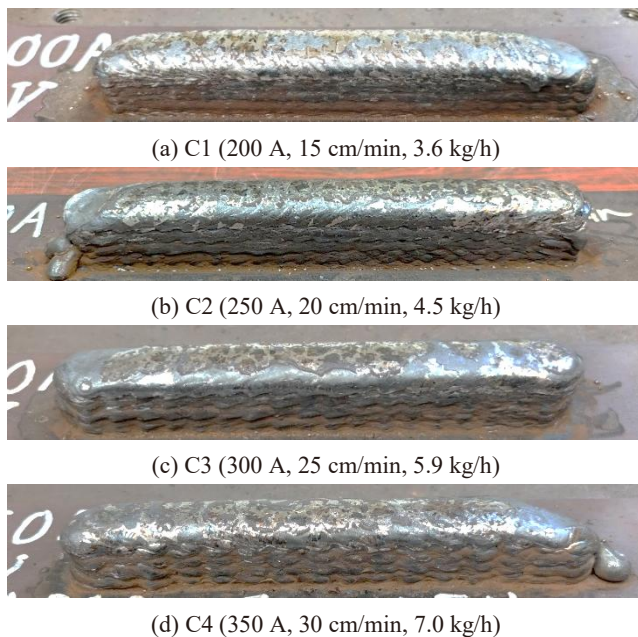


Fig. 9 Appearance of the additively manufactured specimens. (ID: C1 to C4)

試験体中央部断面のマクロ写真を Fig. 10 に示す。全ての条件において内部欠陥は確認されなかった。赤線で囲んだ部分は前節で述べた再熱による微細化がされなかった領域であり、電流が大きい条件ほど、非再熱部が増える傾向が見られた。これは、電流と共に溶接速度が上昇したことでウィービング振幅の間隔が広がった結果、ビード幅方向に入熱が不均一になり、非再熱領域が残留したと考えられる。前述のとおり非再熱部は粗大化したフェライト組織が多く存在するため、これらが機械的性質に悪影響を及ぼす可能性については、今後機械試験により調査する予定である。

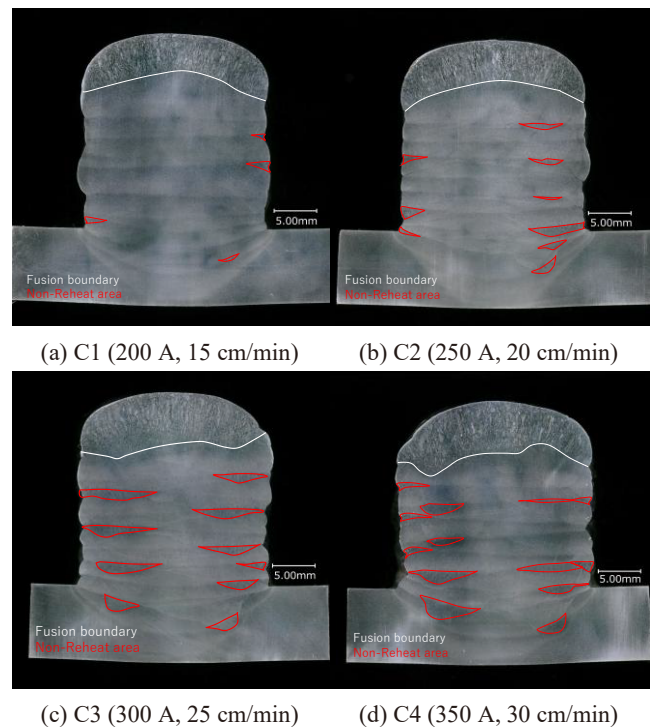


Fig. 10 Cross-sectional observation results of the deposited metal. (ID: C1 to C4)

3.4 大入熱による冷却時間増加の課題

Table 2 に示した C2 条件における各積層プロセスにおけるアーク発生時間と冷却時間の内訳を Fig. 11 に示す。本試験では、試験体温度の過剰な上昇を防ぐためにパス間温度を設定し、温度が設定値以下になるまで自然空冷を実施している。その結果、積層を重ねる毎に冷却時間が増大し、造形時間に占めるアーク点弧時間の割合は 1～2 割程度となっている。これは造形物の高さ増加に伴い基板への抜熱量が次第に減少することに起因すると考えられる。したがって、高さのある造形においては冷却時間がより長くなることが予想されるため、今後は強制空冷や水冷を活用した効率的な冷却手法について検討を進める予定である。

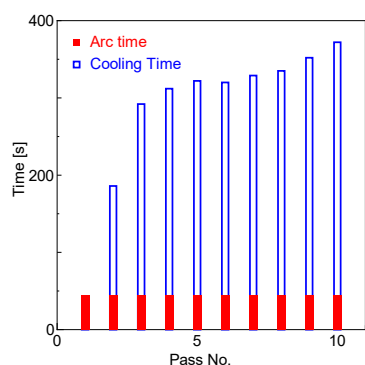


Fig. 11 Time distribution between arc time and cooling time in each deposition pass. (ID: C2)

4. 結 言

1. WAAMにパルスMAG溶接プロセスを使用することでCO₂溶接プロセスと比べ高速な造形を実現し、溶着速度は最大で7.0 kg/hまで向上した。
2. ウィービングを使用することで造形外観およびマイクロ組織分布共に良好な結果が得られた。
3. 積層材は再熱されることで微細な組織に変化するが、積層条件によっては非再熱部が残留することが確認された。ウィービングの適用で再熱範囲が均一化されることを確認した。
4. 高溶着量速度条件では製造時間に占めるアーク点弧時間の割合は1~2割程度に過ぎず、造形速度向上のためには冷却手法が今後の課題であると考えられた。

謝 辞

本研究の一部は、一般社団法人日本溶接協会 2024 年度次世代を担う研究者助成事業の助成を受け実施したものであ

る。本研究の実施に際して、草場卓哉 氏（ジャパンマリンユナイテッド株式会社）より供試材準備および種々有益なご助言をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Masaki, K.: WE-COM Magazine, No. 39, The Japan Welding Engineering Society, 2021.
木寺正晃: WE-COM マガジン第 39 号, 日本溶接協会, 2021.
- 2) Muller, J., Hensel, J., Dilger, K.: Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures, Weld World, Vol. 66, No. 6, pp. 395–407, 2021.
- 3) Inoue, Y., Matsuda, K., Goto, K., Terasaki, H.: Study toward the Establishment of Metal Additive Manufacturing Technology using the WAAM Process, Proceedings of the Kyushu Branch of the Japan Welding Society, Vol. 21, pp. 9-12, 2024.
井上 雄介, 松田 和貴, 後藤 浩二, 寺崎 秀紀: WAAM 方式による金属積層造形技術確立に向けた基礎検討, 溶接学会九州支部講演論文集, 第 21 巻, pp. 9-12, 2024.
- 4) Huang, C., Soliman, M., Treutler, K., Wesling, V., Spitzer, K.-H.: On the Microstructure Development under Cyclic Temperature Conditions during WAAM of Microalloyed Steels, Metals, Vol. 12, No. 11, pp. 1913, 2022.
- 5) Jafari, D., Vaneker, T.H.J., Gibson, I.: Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts, Materials and Design, Vol. 202, Article number 109471, 2021