

WAAM方式による金属積層造形技術確立に向けた基礎 検討

井上, 雄介
九州大学大学院工学府

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院

寺崎, 秀紀
熊本大学大学院先端科学研究部

<https://hdl.handle.net/2324/7325945>

出版情報：溶接学会九州支部講演論文集. 21, pp.9-12, 2024-11-01. 溶接学会九州支部
バージョン：
権利関係：



○井上雄介*¹, 松田和貴*², 後藤浩二*², 寺崎秀紀*³

1. 緒言

本研究では **WAAM** 積層物の積層中の温度履歴、積層後の変形、硬さを数値解析により検討する手法の確立を目的として、直線形状および円弧形状の 20 層壁面を積層造形し、熱伝導および熱弾塑性 FE 解析を実施した。加えて、推定された熱履歴をもとに積層部材の硬さ分布を推定し、実測値と比較することで手法の妥当性を検証した。また **SEM** を用いて造形物のマイクロ組織観察、及び電子後方錯乱回折法 (**EBSD**) を実施した。

2.1 供試材及び実験条件

Fig. 1 Experiment image

Table 1 AM conditions.		Table 2 FEM conditions.	
Arc current [A]	175	Material	SM400A
Arc voltage [V]	21	Heat input efficiency	0.81
Travel speed [cm/min]	30	Heat transfer coefficient [W/m ²]	10
Shielding gas (CO ₂) flow rate [L/min]	18	Heat emission coefficient (base/bead)	0.75/0.89

2.2 FE 解析条件

FE 解析には商用コード Simufact Welding 2023.3 を使用した。3D ソリッド要素を使用し積層造形のシミュレーションを実施した。解析に使用した物性値を Table. 2 に示す。まず熱伝導解析にて温度履歴、熱弾塑性解析にて試験体基板の縦曲がり変形を求めた。

2.3 硬さ推定手法

三上ら³⁾の多層溶接における溶接金属の硬さ推定手法を用いて、積層造形材の硬さ推定を試みた。最高到達温度と冷却速度 $\Delta t_{8/5}$ (800℃から 500℃までの冷却速度) に応じて異なる金属組織、硬さが得られる場合があることを考慮し、再熱時 (A_{C3} 以上に再熱された場合) の最高到達温度 $T_{max} \geq 1200^\circ\text{C}$, $1200^\circ\text{C} > T_{max} \geq 900^\circ\text{C}$ の各温度域にて対応した CCT 線図を使用し、式(1)によりビッカース硬さを推定した。

$$HV = p_F HV_F + p_B HV_B \quad (1)$$

p_F , p_B : ミクロ組織分率, HV_F , HV_B : ミクロ組織単層のビッカース硬さ
(下付き添字 F はフェライト, B はベイナイトを意味する。)

3. 実験、解析結果および組織観察

3.1 直線形状壁における結果

点 P1 および P2 における各層の積層開始直前温度の実測値と解析値の比較を Fig. 3 (a) に示す。また、母材裏面中央における縦曲がり変形の実測値と FE 解析値の比較を Fig. 4 (a) に示す。角変形は母材幅が狭いため変位が小さく、計測が困難であったため、今回は評価対象外とした。Fig. 3 (a), Fig. 4 (a) より、温度、変形ともに良好に予測出来ることを確認した。これにより直線壁形状における FE 解析の妥当性を確認した。

3.2 円弧形状壁における結果

円弧形状壁 ($R = 100 \text{ mm}$, $R = 300 \text{ mm}$) の試験体の積層段階ごとの積層開始直前温度をそれぞれ Fig. 3 (b), (c) に示す。測定点 P1 において、積層後半で実測値が解析値を上回った。これは曲面内側で熱が散逸しにくいためであると考えられるが、FE 解析ではそれを再現できていないと考えられる。したがって、より曲率が小さい形状では、予備実験にて各放熱の係数を得る必要があると考えられる。

母材裏面中央部の縦曲がり変形を Fig. 4 (b), (c) に示す。(c) では変形の実測値と解析値が一致したものの、(b) では解析値の方が実測値より変形が小さいことが分かる。この原因として、直線壁形状及び $R = 300 \text{ mm}$ では縦曲がり変形が主な変形の要素であるため正確に予測が出来たが、一方で、 $R = 100 \text{ mm}$ では縦曲がり変形と角変形が組み合わせられたことから精度が低下したと考えられる。角変形を正確に計算できなかった原因としては FEM メッシュ構造・熱源形状・冷却の不均一性等が考えられるため、今後追加調査を実施する。

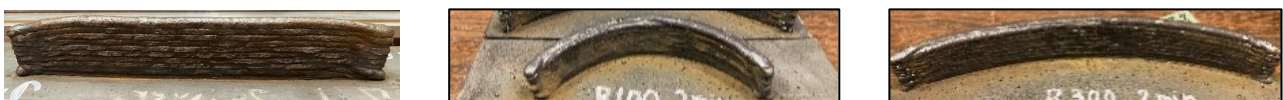


Fig. 2 Specimen (left: Straight wall, center: Curve wall ($R = 100 \text{ mm}$), right: Curve wall ($R = 300 \text{ mm}$)).

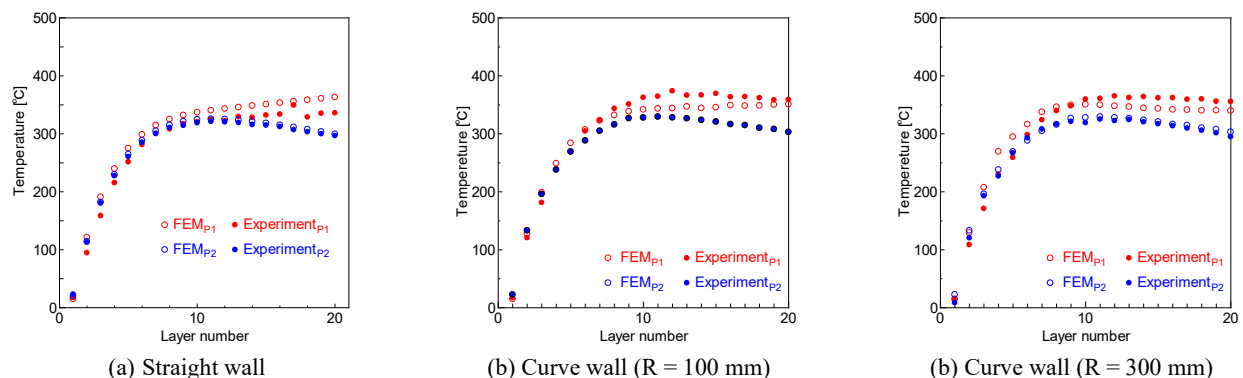


Fig. 3 Temperature histories just before the start of welding for each layer.

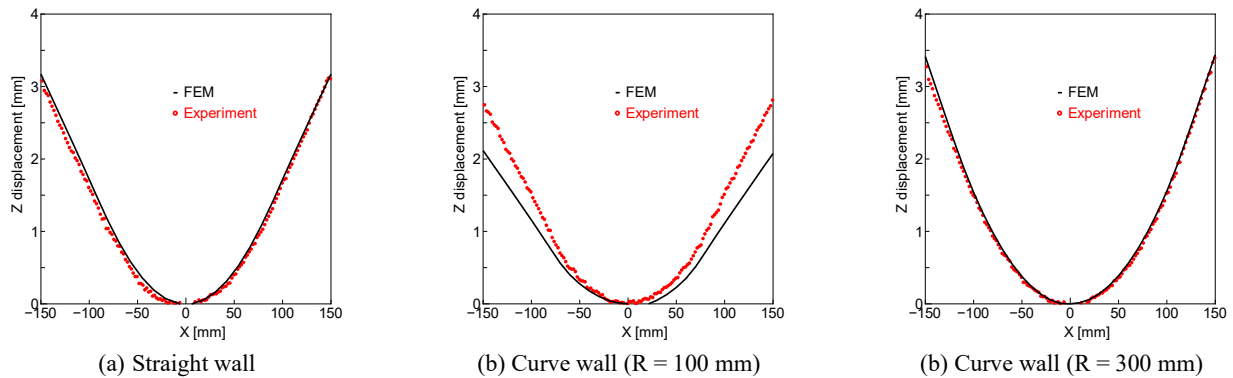
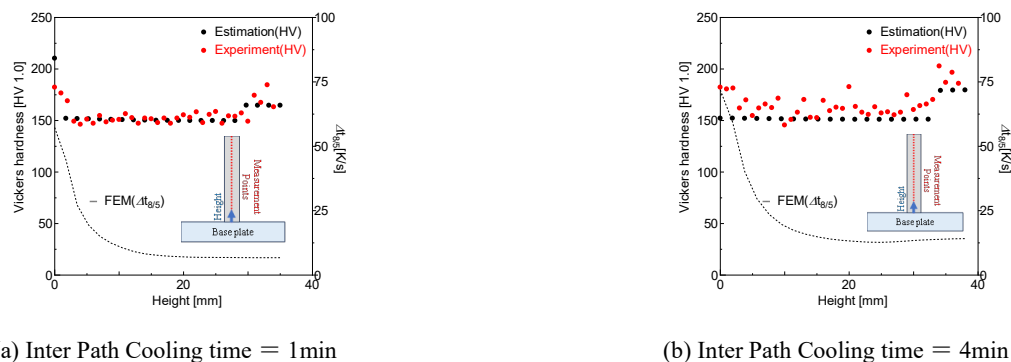


Fig. 4 Longitudinal bending deformation of base plate.

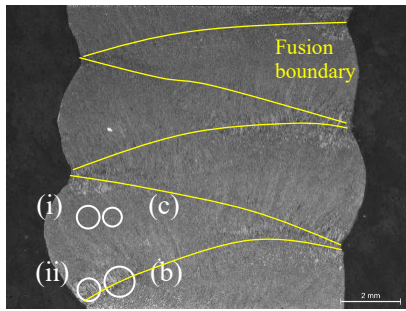
3.3 硬さ計測結果及び推定結果

直線壁形状 (冷却時間 1, 4 分) の試験体中央部断面における高さ方向のビッカース硬さ分布を測定した実測値および式(1)による推定値の比較を Fig. 5 に示す. まず実測値では高さ 0 mm 付近では基板に近い再熱時に十分に上昇しなかった事, 及び冷却速度 $\Delta t_{8/5}$ が大きいためベイナイトおよびフェライトの混合組織となり硬度が高くなると推定される. 中央部では再熱の影響及び冷却速度が小さいことからフェライト主体の組織となり, 硬度が低下している. 最上部では最終積層パスのため再熱されず, ベイナイトおよびフェライトの混合組織となり硬さが上昇したと推定される. パス間冷却時間が 4 分間の場合(b)では硬さにバラつきが生じているが, この点に関しては次節にて後述する. また三上らの推定手法では硬さ分布をおおよそ推定する事が出来る事を確認した. 本手法は再熱を考慮した推定手法であるが, 再熱時の最高到達温度と冷却速度をパラメータとする事で積層造形における硬さ分布を推定するのに有効であることを確認した.

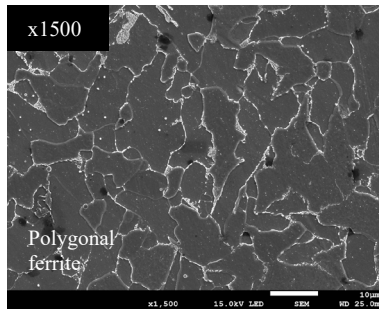
Fig. 5 Hardness and Cooling speed ($\Delta t_{8/5}$)

3.4 組織観察

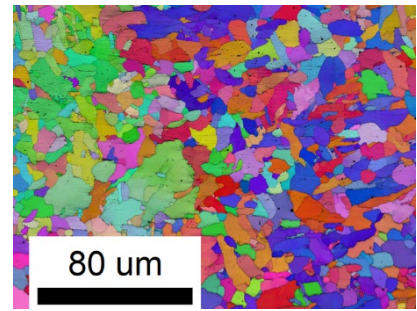
パス間の冷却時間が 4 分間の試験体中央を切断した後, エッチング処理を行い SEM によるミクロ組織観察を実施した結果を Fig. 6 に示す. まず(a)より, マクロ観察では黄線部の溶融境界付近に異なった組織が存在している事が確認できる. (b)においては塊状のフェライト組織が確認でき, (c)では粒界フェライトとアシキュラーフェライトの混合組織となっている. 多層溶接において溶接されたままの原質部は(b)のような組織となっているが, 再熱部では焼きなましされ(c)のような組織となる. パス間冷却時間が長いと積層壁の温度が低下し再熱時に A_{C3} 点以上まで温度が上昇せず, 原質部が溶融境界付近に残留すると考えられる. Fig. 7 において電子後方散乱回折 (EBSD) 解析結果を示す. (i)では比較的粗大で粒径の揃った塊状のフェライトが確認でき(ii)では粗大な羽毛状の粒界フェライトと微細なアシキュラーフェライトが確認できる. また, (ii)の羽毛状粒界フェライト内で方位が変化していることから, 粒内にひずみ (転位) が蓄積されていると予想される. 一方で, (i)では粒内で方位はほぼ一定で, 再熱により焼きなましされ転位が除去されたことが推測される. 残留した原質部は軟らかい粒界フェライトと硬いアシキュラーフェライトの混合組織となっており, フェライトが大半である再熱部と比較して硬度が相対的に高くなっている. そのため Fig. 5 (b)において, パス間冷却時間が 4 分間では比較的軟質な再熱部の間に硬質な原質部が存在するため硬度分布にバラつきが生じていると推測される.



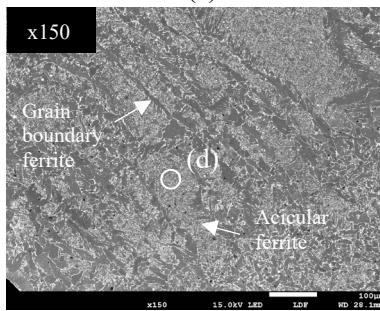
(a)



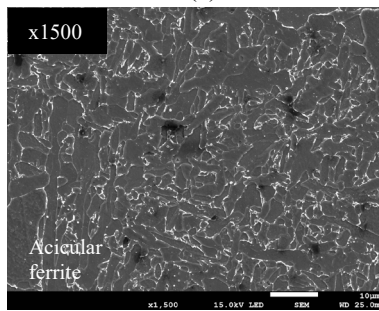
(c)



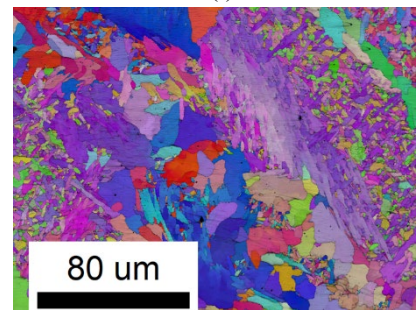
(i)



(b)



(d)



(ii)

Fig. 6 Microstructure observation by SEM

Fig.7 IPF mapping image by EBSD

4. 結言

- 1) 直線壁形状において熱伝導解析及び熱弾塑性解析を用いることで、各積層段階における造形開始直前の温度及び縦変形を精度よく予測出来た。
- 2) 曲線壁形状において直線壁と同様の解析条件・実験条件を用いて温度・変形を予測した結果、各積層段階における造形開始直前の温度を予測する事は可能であることを確認したが、曲率が小さい $R = 100 \text{ mm}$ における変形予測は直線壁と比べ精度が劣位な結果となった。
- 3) 三上らが提唱した手法を用いることで再熱による組織変化を考慮した予測が可能であることを確認した。
- 4) SEM を用いた組織観察によりパス間の冷却時間が長くなると層間に比較的硬質な原質部が残留し、機械的性質に影響を与える可能性がある為、今後調査を実施する。

謝 辞

本研究は、一般社団法人日本溶接協会 2023 年度研究テーマ指定助成事業、および 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。

参 考 文 献

- 1) Farias, F. W. C., da Cruz Payão Filho, J., e Oliveira, V. H. P. M. Prediction of the interpass temperature of a wire arc additive manufactured wall: FEM simulations and artificial neural network. Additive Manufacturing, 48, 102387 (2021).
- 2) Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., Campatelli, G. Finite element modelling of wire-arc-additive-manufacturing process. Procedia Cirp, 55, (2016), 109-114.
- 3) 三上欣希, 望月正人, 橋場裕治, 長谷川俊永, 大北茂, 豊田政男.(2005).多重熱サイクルを受ける溶接金属の組織分率と硬さ分布特性の評価-溶接熱サイクルおよび組織分率の数値シミュレーションによる溶接部の硬さ分布特性評価に関する研究 (第 2 報)-. 溶接学会論文集, 23 (4), 564-570