

ワイヤーアーク方式金属積層造形の残留応力及び変形の評価

Evaluation of residual stress and deformation in wire and arc additive manufacturing

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 小林翼 穴澤大樹

国立大学法人東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 笹原弘之

ワイヤーアーク式金属積層造形におけるベースプレート側の変形及び残留応力を、実験とシミュレーションの双方から評価した。変位、残留応力の分布はいずれも実験値とシミュレーション結果が高い精度で一致した。一方、定量値は、ベースプレートに予め存在した残留応力によってズレが生じた。今回の結果から、分布の把握や最大変位、最大残留応力となる箇所特定にシミュレーションを活用することが望ましく、その際のシミュレーションでの熱源形状は入熱量からの推定計算値でも十分な精度を有することがわかった。

Key words: 金属積層造形、WAAM 方式、変形、残留応力、シミュレーション

1. 緒言

昨今、世界的に金属積層造形（以下、積層造形とする）技術の活用が進んでおり、パウダーベッド方式 (PBF) や指向性エネルギー堆積方式 (DED) など様々な手法が開発されている。積層造形は、設計の自由度が高く、軽量化や部品点数削減等のメリットがあるため、従来の加工方法に代わる製造技術として注目されている。当所では、DED 方式のうち、金属ワイヤをアーク放電により溶融、凝固させるワイヤーアーク方式金属積層造形（以下、WAAM 方式とする）を対象に研究を行ってきた。これまでの研究結果¹⁾から、スクリュープローラ形状等、除去量の多い加工においては、切削加工に比べ、WAAM 方式の方が加工時間と除去量において優れていることが分かっている。特に、難削材においては、加工時間や工具代、材料費の観点から、積層造形のメリットが大きいと考えられる。一方で、積層造形を導入し製品の生産に活用する際には、造形物の機械的特性の把握に加え、加工精度確保のために積層時の熱影響による変形や残留応力による変形等を把握する必要がある。しかしながら、積層造形に関する研究は PBF 方式や金属粒子を用いた DED 方式が主であり、WAAM 方式の研究は知見が少ない状況である。我々もこれまで、機械的特性の把握を中心に研究を行ってきたため変形に関する知見が少ない状況である。変形の予測ができない現状では、新しい形状を造形する際の入熱条件、削り代、熱処理のタイミングなどは実験的に試行錯誤して条件出しする必要がある、かかる時間とコストが課題となる。

そこで、本研究では、積層造形、熱処理、加工の各工程での変形や物性の変化を調査し、どの順序で行うことが最適であるか明らかにし、WAAM 積層造形プロセス導入の際の効率化を図る。さらに、CAE により事前に最適な入熱条件やパスを検討することで、変形を予測、抑制できる技術の確立を目指す。

具体的には次の点について評価検討する。

- ①CAE を用いた入熱条件や造形パスの検討手法の確立
 - ②代表的な形状を対象とした、各工程における残留応力、変形量の把握
 - ③熱処理前後における切削性の変化
- 研究の第一報である本報では、①と②の点について評価検討を行い、CAE の適用可能性について確認した結果を報告する。

2. 実験

2. 1. 積層造形品による実験的評価

2. 1. 1 積層造形サンプル作製

積層造形には、ヤマザキマザック（株）製のハイブリッド複合加工機 (VARIAXIS j-600/5X AM WAAM 方式) を用いた。積層造形条件は表 1 のとおりである。ここで、“CMT” は“Cold Metal Transfer”の略称であり、ワイヤ送給制御による低入熱、低スパッタを特徴とする溶接方法である。金属ワイヤは直径 1.2[mm] の JIS 規格 YS316L 相当である（株）タセト製 MG316L を使用した。MG316L 及び類似組成の SUS316L の主な化学成分を表 2 に示す。ベースプレートは厚さ 9[mm]、150[mm] 角のオーステナイト系ステンレス鋼製プレートとし、シールドガスには Ar を使用した。

造形パスを図 1 に示す。80[mm] 角のロの字形状を 1 層造形する。本研究では、CAE 活用の基礎検討を行うにあたり、検討パラメータを絞ったシンプルな実験系としたいため、1 層のみの造形とした。

表 1 積層造形条件

電流	電圧	ワイヤーフィード	トーチ送り	シールドガス
[A]	[V]	[m/min]	[mm/min]	
243	13.8	9.0	600	Ar

表 2 MG316L および SUS316L の化学成分

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]
MG316L	≤0.03	≤0.65	1.0~2.5	≤0.03	≤0.03	11.0~14.0	18.0~20.0	2.0~3.0
SUS316L	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.03	12.0~15.0	16.0~18.0	2.0~3.0

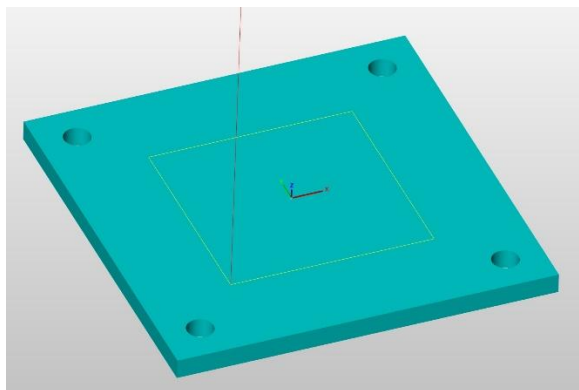


図 1 造形パス



図 2 造形前の様子

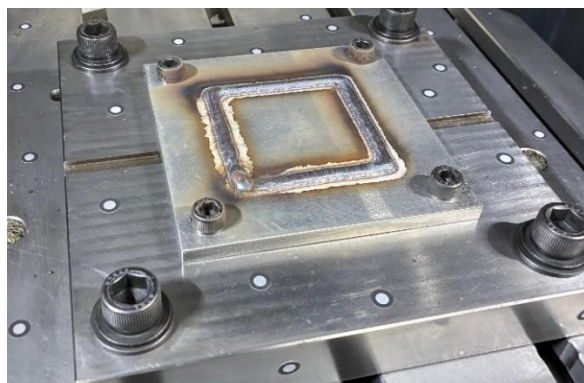


図 3 造形後の様子

2. 1. 2 変位測定

変位測定には、SHINING 3D 社製の 3D デジタイザ (Free Scan Combo+) を用いた。測定は積層造形による母材ベースプレートの変形をみるため、ベースプレートの取付け時 (造形前) (図 2)、積層造形後 (図 3)、固定ボルト緩め後それぞれで行った。測定条件は表 3 のとおりである。変位の算出はベースプレート取付け時を基準とし、造形後、固定ボルト緩め後それぞれの測定結果をベストフィット法により位置合わせして評価した。測定では造形前後で形状に変化がないテーブルや治具類も同時にデータ取得しており、ベストフィット法でも十分にベースプレートの変形を確認できると判断した。

表 3 変位測定条件

モード	レーザースキャン
レーザーライン	26本クロスレーザー
光源	ブルーレーザー
スキャン精度	0.02 [mm]
スキャン範囲	520×510 [mm]
点間ピッチ	0.5 [mm]

2. 1. 3 残留応力測定

残留応力はパルステック工業 (株) 製の残留応力測定装置 (μ -X360s) により、 $\cos \alpha$ 法によって測定した。管球は Mn を用い、コリメータ径は 1.0mm とした。測定位置は、ベースプレート裏面とし、図 4 のように 10mm ピッチでマッピングを行った。測定点は図中の各交点とした。応力の測定方向は図中 Y 軸方向とした。以降、ベースプレート左下の角を原点として XO [mm] YO [mm] のように測定位置を示す。残留応力の測定位置を母材プレート裏面とした理由は、積層造形部よりも拘束が強く残留応力の値が大きくなりやすいことに加え、平滑な面で比較的ランダムな結晶方位となっており測定が安定するためである。なお、過去の研究²⁾においても積層造形部よりも母材プレートの方が大きな残留応力が確認されている。

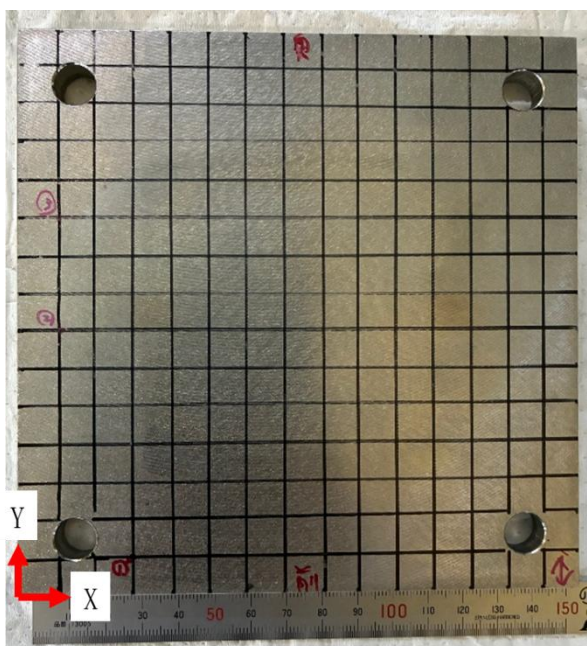


図4 残留応力測定位置

2. 2. 溶接シミュレーションによる解析

2. 2. 1 ソフトの概要と解析モデルの作成

溶接時の変形、残留応力の解析には、MSC 社製溶接シミュレーションソフト（Simufact.Welding）を用いた。本ソフトは溶融現象を考慮せず、固体力学の範疇でのみ計算を行うことが特徴的である。溶融池内に投入されるエネルギー分布を熱源として入力することで、間接的に溶融池での流れの効果などを考慮する。マクロ観察結果を用いた熱源のキャリブレーションにより、実現象に近いモデルの作成ができることを強みとしている。

解析モデルは図5のように母材ベースプレート、ボルト、ベースプレートをそれぞれ要素化し、計算対象とした。母材プレート材料にはSimufact.Weldingのライブラリに保存されているオーステナイト系ステンレス鋼を用い、その他の治具類については同じライブラリ中の一般鋼材を用いた。材料の初期温度および各要素間の熱伝達係数については、図6のように設定した。対流熱伝達係数は一般的な自然対流を想定し、接触熱伝達係数は各材料の熱伝導率の中間的な値とした。溶接パスは、図7のように実験と同様の口の字形状のパスとした。

解析は熱構造計算とし、変形や残留応力の計算まで行った。解析は溶接開始後から900秒までとした。このとき造形終了時間は31.5秒、900秒時点で全体の最高温度は100度以下となっており、以降の冷却では変形や残留応力の変化が軽微であると判断した。

前述したモデルでの解析では、ボルト締結の影響を受けた変形、残留応力の結果となる。ボルトを外した後の変形、応力分布についてはSimufact.Weldingの熱

処理機能を用いて解析した。Simufact.Weldingでは、解析後の熱履歴や変形、応力等を内部データとしたモデルが出力できる。このモデルを読み込み、図8のように20℃一定で3分間保持する熱処理を行った。この時、プレートの台座には計算から除外される要素であるベアリングを用いた。熱処理解析時のモデルを図9に示した。この結果をボルト緩め後の変形や残留応力の値として用いた。

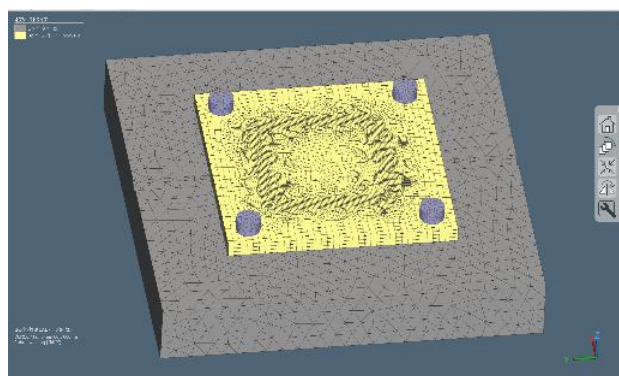


図5 解析モデル

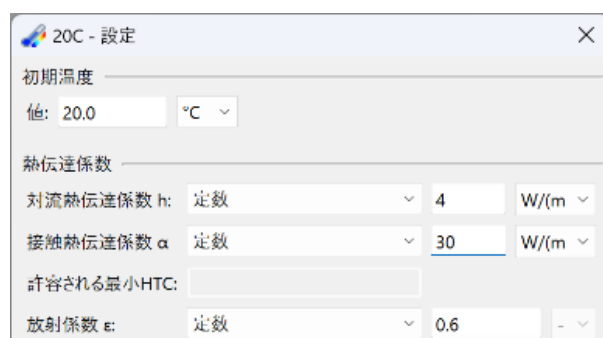


図6 材料温度および熱伝達係数の設定

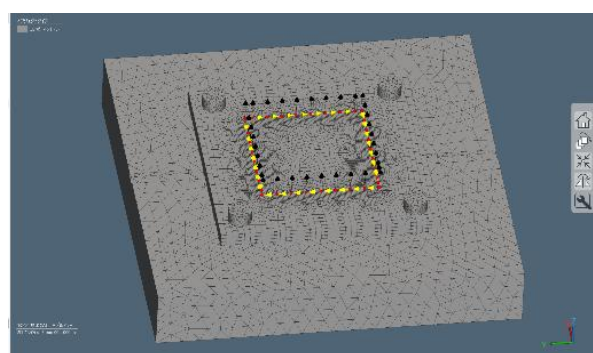


図7 材料温度および熱伝達係数の設定

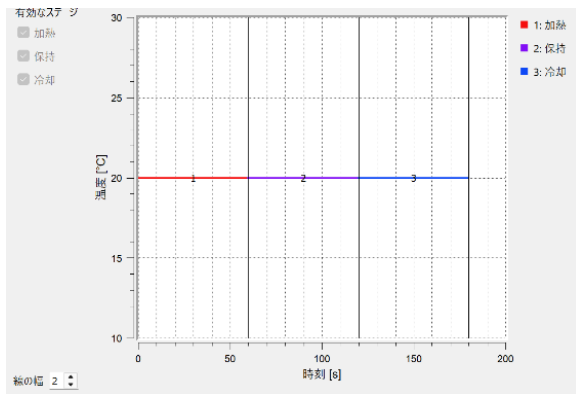


図8 熱処理条件設定

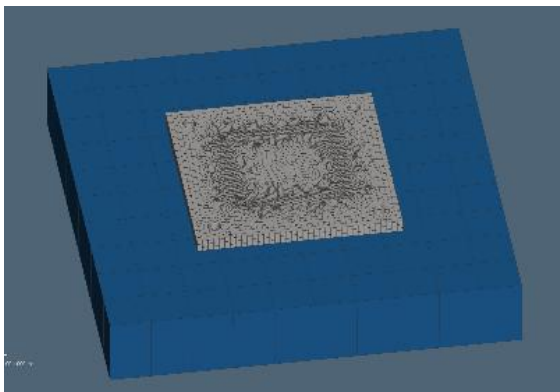


図9 熱処理解析時のモデル

2. 2. 2 熱源形状の決定

前述のとおり、Simufact.Weldingでは熱源のキャリブレーションにより実現に近い解析ができることが特徴である。本研究でも造形断面のマクロ観察結果を基にした熱源形状作成に取り組んだ。

キャリブレーション用のマクロ観察手順は次のとおりである。試料を切断後、樹脂包埋、鏡面研磨を行った。その後、10[%]シュウ酸水溶液中に浸漬し、3[V]で30秒間電解エッチングした。観察は、オリンパス(株)製の高倍率金属顕微鏡(GX-71)により行った。観察結果を図10に示した。ビード幅が7.2[mm]程度、溶け込み深さが1.5[mm]程度であった。

この結果を用いて、図11のように熱源形状を設定した。熱源形状のキャリブレーションについては、本来、図12の溶接モニター機能により行うことが望ましい。図12では、液相線より高い温度域を赤く、液相線と固相線の間の温度域を黄色で示している。ただ、WAAM方式ではCMT溶接という特殊な溶接手法となるため、溶接モニターによる形状の合わせこみが難しく、ビード幅と溶け込み深さにより熱源形状側を決定することとした。溶接モニターによるキャリブレーションは次年度以降の課題とする。

熱源形状は投入熱量から推定計算することも可能であり、キャリブレーション熱源との比較のため、投入

熱量からの推定熱源形状による計算も行った。推定熱源形状を図13に示す。推定値では、キャリブレーションした熱源よりもビード幅が小さく溶け込みが深い形状となっている。

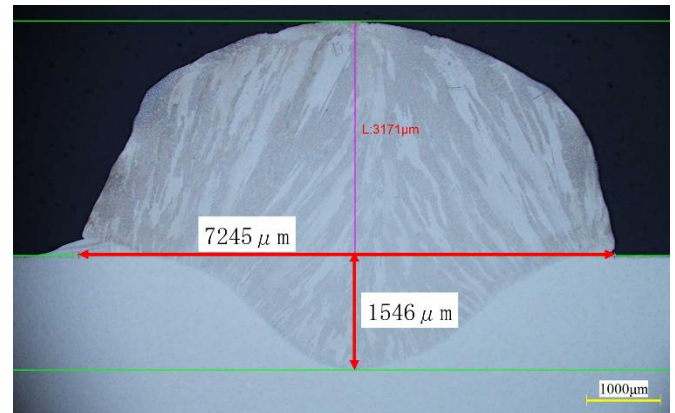


図10 造形断面のマクロ観察結果

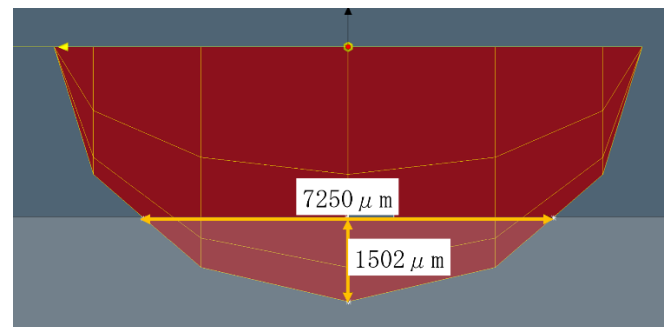


図11 キャリブレーションした熱源形状

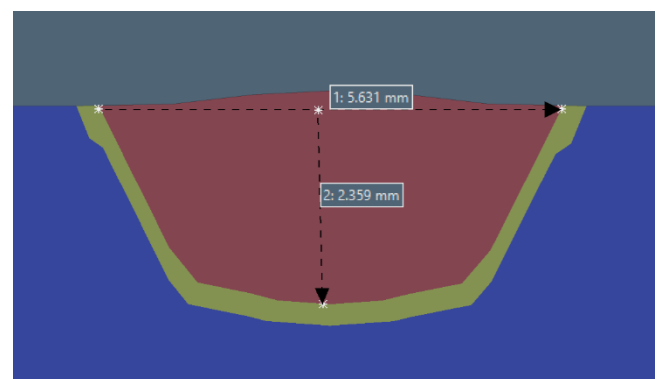


図12 溶接モニター機能

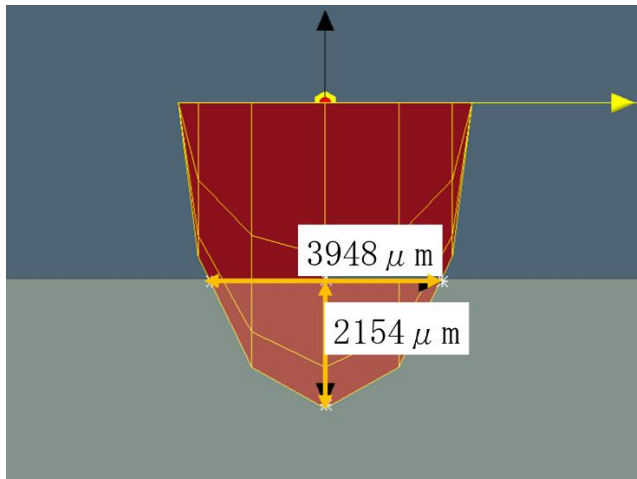


図 13 キャリブレーションした熱源形状

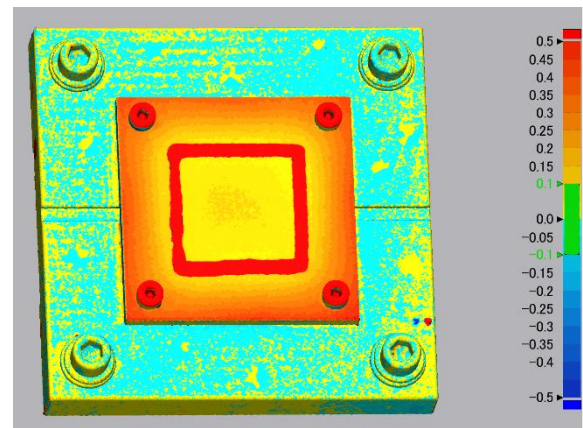


図 15 ボルト緩め後の変位カラーマップ

3. 結果と考察

3. 1. 積層造形品による実験的評価

3. 1. 1. 変位測定

造形後の変位カラーマップを図 1 4 に、ボルト緩め後の変位カラーマップを図 1 5 に示す。加工装置に取り付けたままの機上での計測であったが、金属光沢面によるデータの欠落などは見られず、良好な形状データが得られていた。ボルト緩め前では、上下左右方向で同様の形状に変形していることが確認でき、ボルト緩め後では、固定されていた四隅が周りと同程度変形し、造形形状に沿って、中心から外側に向かうにつれて変形量が大きくなり、中央の変形量が減少することが確認できた。ボルト緩め前後で変形箇所の違いが見られた一方で、最大変位についてはいずれも 0.5[mm] 程度であり、積層造形始点、終点付近など特徴的な位置での変化は見られない対象性を持った分布となった。

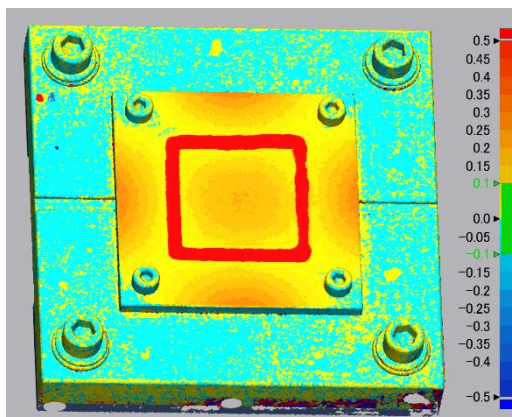


図 1 4 造形後の変位カラーマップ

3. 1. 2. 残留応力測定

図 1 6 にプレート裏面を測定した際の代表的なデバイ環形状を示す。全周にわたってピークが得られており、信頼性の高いデータが得られていることが分かる。図 1 7 には、残留応力のマッピング結果を示す。図はカラーマップで示しており、最大値 60[MPa] を赤、最小値 -663[MPa] を青としている。全体的に圧縮の応力が残留しているが、積層造形部の真裏では引張の応力が見られる箇所もある。全体が圧縮の応力となっている要因としては、造形前のプレートにもともと圧縮の応力がかかっていることが考えられる。造形前のプレートの残留応力値を確認してみると、図 1 7 の X80[mm]Y80[mm] にあたる箇所で -417[MPa]、X80[mm]Y10[mm] にあたる箇所 -301[MPa] となっていた。このことは、シミュレーション解析結果との比較においても考慮すべき点である。

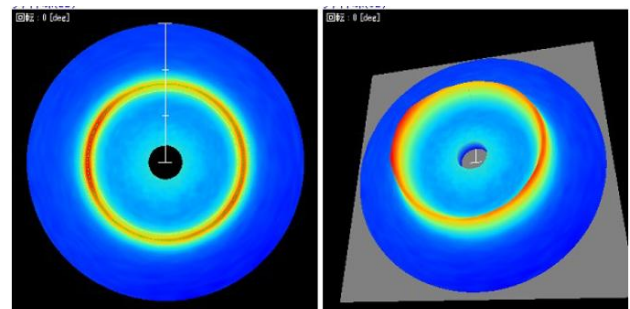


図 1 6 デバイ環形状(測定位置: X10mm, Y10mm)

単位[MPa]

140			-369	-306	-343	-223	-304	-281	-268	-283	-216	-279		
130			-146	-252	-341	-283	-329	-193	-224	-284	-216	-32		
120	-333	-335	-283	-237	-282	-235	-202	-210	-171	-249	-167	-88	-229	-143
110	-314	-385	-257	-580	-498	-383	-495	-442	-424	-380	-481	-329	-166	-228
100	-392	-417	-291	-303	-371	-461	-372	-420	-400	-307	-296	-383	-367	-307
90	-448	-318	-143	-175	-255	-287	-275	-288	-299	-244	-90	-149	-324	-339
80	-569	-380	-2	-3	-115	-193	-146	-241	-142	-126	60	-39	-400	-442
70	-568	-504	-148	-65	-213	-106	-242	-248	-251	-214	-38	-4	-375	-548
60	-602	-523	-269	-172	-321	-284	-331	-361	-282	-231	-24	-5	-338	-507
50	-503	-495	-432	-391	-365	-370	-433	-424	-428	-394	-259	-195	-366	-393
40	-344	-319	-393	-663	-491	-409	-399	-331	-422	-531	-432	-321	-244	-287
30	-316	-283	-169	-40	-182	-240	-303	-278	-272	-286	-289	-88	-226	-231
20			-184	-248	-250	-234	-302	-268	-325	-306	-166	-85		
10			-185	-209	-253	-149	-240	-264	-322	-309	-273	-253		
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140

X軸 [mm]

Y軸 [mm]

図 1 7 残留応力マッピング結果

3. 2. 溶接シミュレーションによる解析結果

3. 2. 1. 変位計算結果

キャリブレーション熱源による変位計算結果を図 1 8、図 1 9 に、推定熱源による変位計算結果を図 2 0、図 2 1 に示した。熱源による差はほとんど見られない結果となった。いずれもカラーマップの様子は 3. 1.

1. 実験結果と高い精度で合致している。一方、変形量で比較すると、シミュレーション結果の方が小さい値となっている。これは、前述した造形前プレート自体の残留応力が影響している結果と推測される。造形時にはプレートが加熱され、残留応力の解放には十分な温度帯となる。圧縮の残留応力が解放されれば、全体的にプレートが伸びるため、実験での変位の値が大きくなると考えられる。

以上のことから、シミュレーションによる変位の予測では、全体的な変形の傾向や最大の変位を示す箇所の特定は可能であるが、定量性にはやや欠けることが分かった。定量精度を上げるためには、積層造形前の残留応力分布測定、シミュレーションへの落とし込みが必要と見込まれるが、かなりの手間とコストがかかるため、現実的ではないと考える。

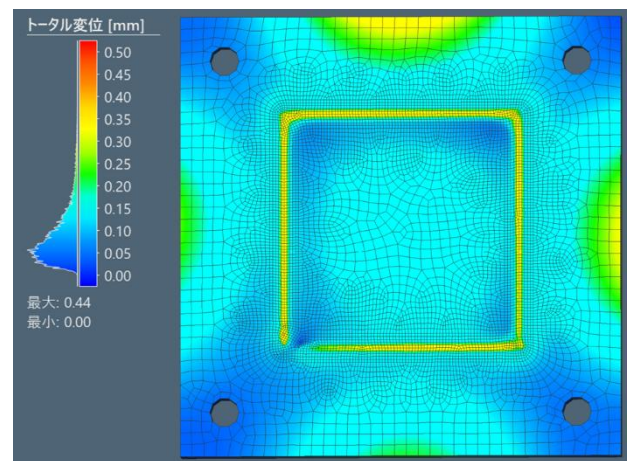


図 1 8 造形後の変位計算結果
(キャリブレーション熱源)

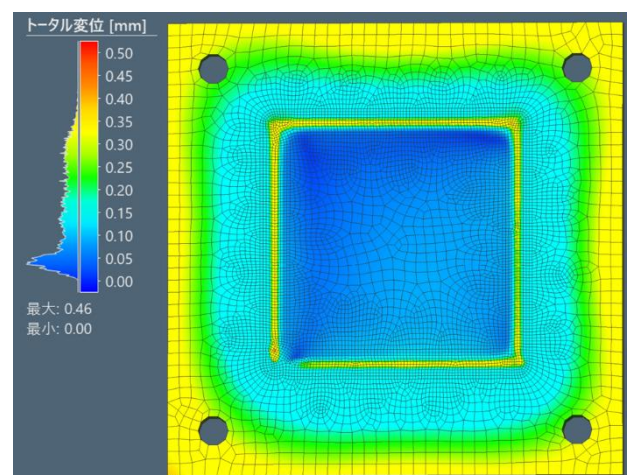


図 1 9 ボルト締め後の変位計算結果
(キャリブレーション熱源)

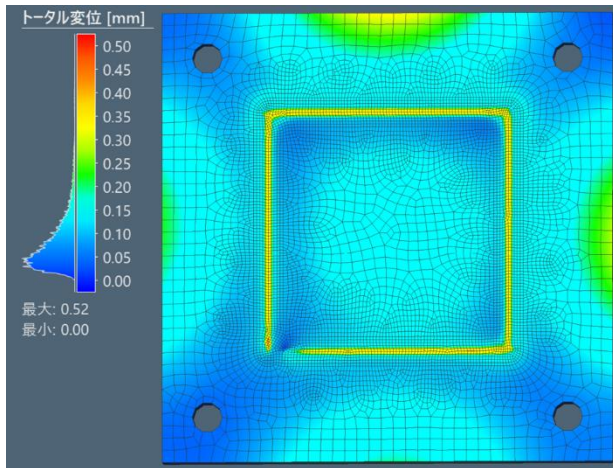


図 20 造形後の変位計算結果
(推定熱源)

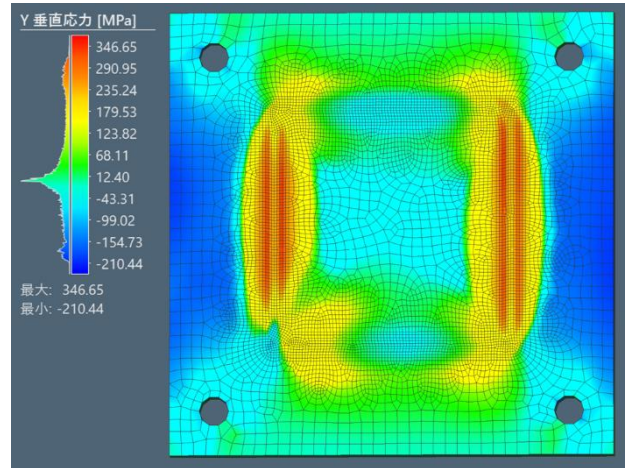


図 22 残留応力計算結果
(キャリブレーション熱源)

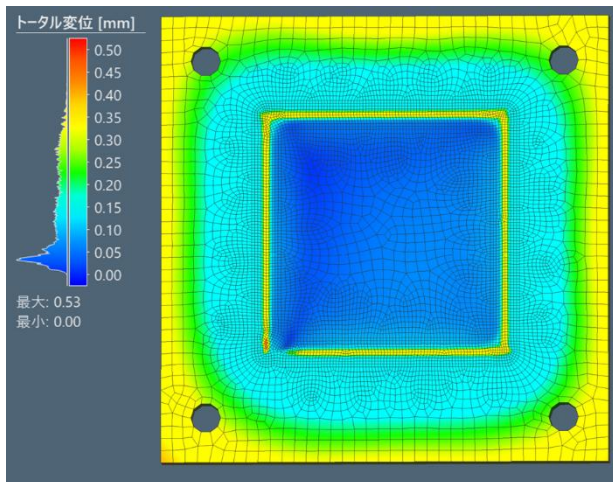


図 21 ボルト緩め後の変位計算結果
(推定熱源)

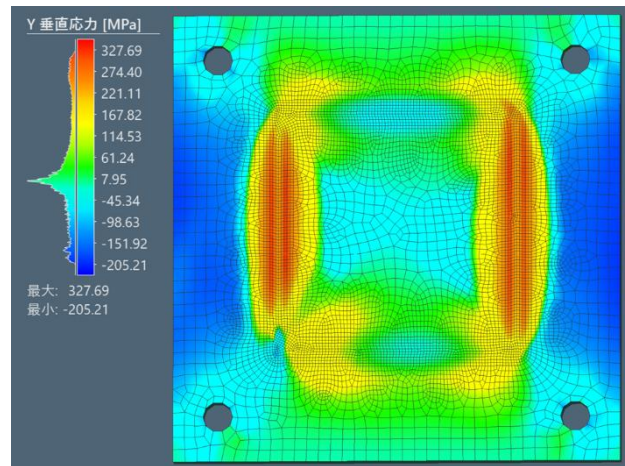


図 23 残留応力計算結果
(推定熱源)

3. 2. 2. 残留応力予測結果

図 22 にキャリブレーション熱源による残留応力計算結果を、図 23 に推定熱源による残留応力計算結果を示した。いずれもボルト緩め後の結果を示している。カラーマップについては、実験結果とかなり一致していることが分かる。一方で、値については全体的に実験値より 300 [MPa] 程度高い値となっている。この 300 [MPa] という値は造形前プレートの残留応力値と近い値である。これを考慮すると、変形や削り代を検討するには十分な精度での残留応力計算ができる可能性がある。ただし、母材側の残留応力を把握することは困難な場合も多く、シミュレーションによる予測は、変位と同様に分布の把握や応力最大となる箇所の把握に用いることが望ましいと考えられる。なお、この使い方であれば、投入熱量による熱源形状推定でも十分な精度を得られており、試作毎に熱源キャリブレーションを行う必要性は低いと考えられる。

4. 結言

ベースプレート上にロの字形状を 1 層造形した際の変形や残留応力について、実験的評価およびシミュレーションによる解析を行い、以下の結果を得た。

- 1) ブルーレーザー式の 3D デジタイザにより、加工機上で造形後、固定ボルト緩め後それぞれの変形を測定評価することができた。
- 2) 実験値とシミュレーション結果との比較では、変位、残留応力のいずれも分布は高い精度で一致していた。
- 3) 一方、定量値についてはズレがあり、母材ベースプレートにもともと存在した残留応力がズレの主な原因と考えられる。
- 4) 分布や最大変位、最大残留応力となる箇所の把握にシミュレーションを活用することが望ましい。その際、熱源の形状については入熱量からの推定値でも十分な精度を有すると考えられる。

参考文献

- 1) 安齋弘樹. 複雑形状加工時の切削加工と金属積層造形のコスト比較. 令和2年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2020.
- 2) 安齋弘樹, 穴澤大樹. 3次元金属積層により作製されたアルミ合金構造体の機械的特性に関する研究. 令和4年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2022.