

金属積層造形における造形品質向上技術の開発

村川 収*

Development of Technology to Improve Build Quality in Metal Additive Manufacturing
Osamu Murakawa

本研究では、造形条件設定の指針の確立に向けて、数値シミュレーションを用いて造形材料の高温物性値の影響を調査した。また、造形時に生じる熱に着目し、造形物の寸法や高さが造形状態へ及ぼす影響について、二種の造形材料を用いて実際に造形することにより調査した。その結果、造形材料の高温物性値を考慮することにより、数値シミュレーションで残留応力が低い造形条件と、実際の造形で高い相対密度が得られる造形条件とで一致が見られた。また、二種の造形材料ともに造形寸法が小さいほど相対密度は低くなることが分かった。

1. 緒言

生産技術の一つとして確立されつつある Additive Manufacturing (付加製造) 技術は、装置の低価格化により、主に試作用途として樹脂材料を中心に広く活用されている。また、造形物を製品や金型として利用するために、高強度かつ耐熱性を有する金属材料を用いた造形が増加傾向にある^{1,2)}。

しかし、金属材料を用いた一般的な造形手法である Powder Bed Fusion (粉末床熔融結合法) は、造形する際のレーザー出力や走査速度といった造形条件が適切でなければ、造形物にボイドやクラックなどの不良が生じる。通常、造形条件の検討はブロック体など任意の形状で行うが、厳密には造形する寸法、形状、高さ及び数など造形物の仕様によって適切な造形条件は異なるため、一つの造形条件で種々の造形に対応することは困難である。また、一般的に造形条件の評価に用いられるエネルギー密度は、単位体積あたりの投入エネルギー量を表しているが、上記造形物の仕様によって異なる粉末床等の各種の温度状態は考慮されていない。これらの課題への対策として、近年では数値シミュレーションを活用した造形の事前予測が行われており、造形不良の低減や検討に要する造形試作の削減が期待されている^{3,4)}。

実際の製造現場で金属積層造形技術を利用する場合、種々の寸法、形状、姿勢に対応した造形条件設定のための指針を確立することが重要である。本研究では、造形条件設定の指針の確立に向けて、数値シミュレーションを用いて造形材料の高温物性値の影響を調査した。また、造形時に生じる熱に着目し、造形物の寸法や造形高さが造形状態へ及ぼす影響について、二種の造形材料を用いて実際に造形することにより調査した。

2. 実験方法

2・1 数値シミュレーションによる解析方法

金属の造形においては、熔融から凝固まで幅広い温度域が生じる。そこで造形材料の高温物性値の考慮の有無によ

る違いについて、造形物の残留応力を評価指標として数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションには、MSC Software 社製 Simufact Additive を用いた。解析方法は熱構造連成解析とし、造形プレートからの切断までを解析対象とした。数値シミュレーションモデルを図 1 に示す。造形物は幅 15×奥行 15×高さ 15.5mm、造形プレートは幅 160×奥行 160×高さ 20mm で、ボルトによる造形プレート

の固定を考慮し、四隅を固定拘束条件とした。造形材料はマルエージング鋼とした。数値シミュレーションで利用する高温物性値データを取得するため、室温 (23°C) に加え 300, 400, 500, 600, 700, 900, 1100°C で引張試験を行った。引張試験により得られた結果から求めた各温度におけるヤング率を図 2 に、真応力-塑性ひずみを図 3 に示す。ただし、500°C の試験では試験機の許容荷重を超えたため、破断には至っていない。設定した温度や塑性ひずみ等が解析時に超過した場合には、その直近のデータが用いられる。ポアソン比は 0.3 で一定とした。高温物性値の考慮の有無が解析結果へ及ぼす影響を調べるため、図 2, 3 に示す 1100°C までのすべての引張試験データを用いた場合と、室温 (23°C) のみの引張試験データを用いた場合の 2 通りの解析結果を比較した。

熱物性値は、ソフトウェアのデータベースから MS1 (EOS 社製マルエージング鋼) の値を参照した。そのうち温度に依存する熱伝導率を表 1 に示す。比熱は $450 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、固相線温度は 1385°C、融点は 1457°C で一定とした⁵⁻⁷⁾。

走査ピッチ w は 0.105mm、積層厚 h は 0.03mm とし、レーザー出力 P を 100~200W、走査速度 v を 500~2000mm/sec の範囲で変えて解析を行った。

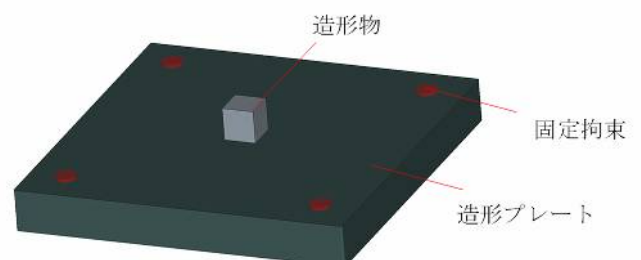


図 1 数値シミュレーションモデル

* 技術支援部 製品技術グループ

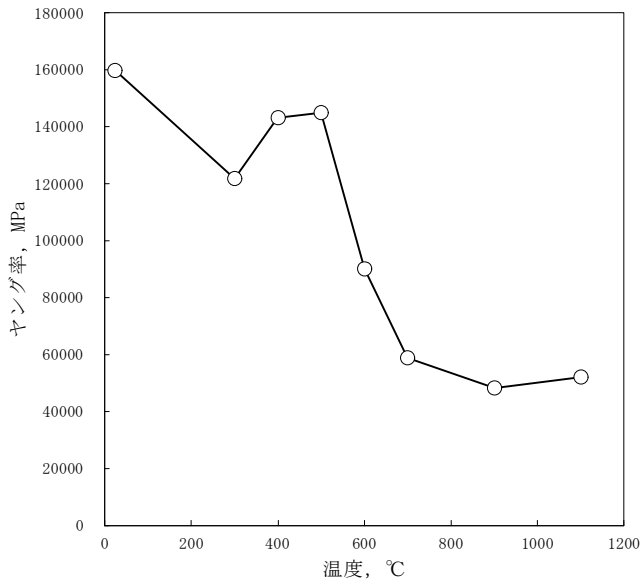


図2 温度とヤング率の関係

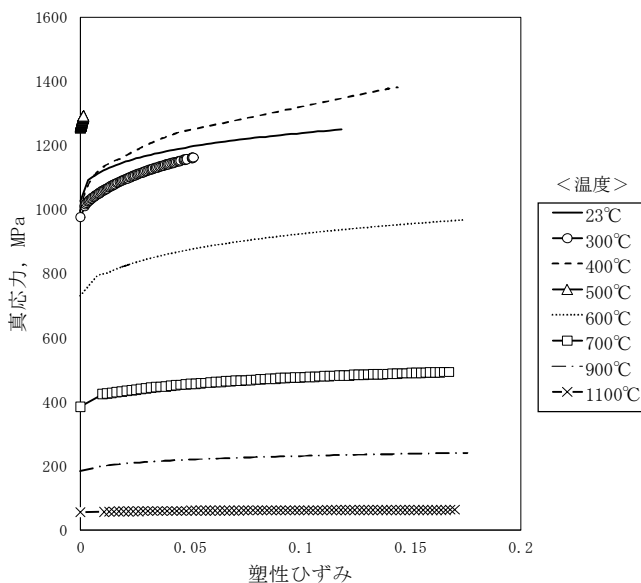


図3 各温度における塑性ひずみと真応力の関係

表1 各温度における熱伝導率

温度 [°C]	熱伝導率 [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
24	25.3
149	28.0
316	30.4
427	30.8

2・2 実造形による寸法及び造形高さの影響調査

積層方向に対して垂直方向の寸法及び造形高さが造形状態に及ぼす影響について、造形条件を変えて調査した。造形には金属積層造形機 Concept Laser 社製 M2cusing を用いた。図4に造形サンプルを示す。サンプル形状は直方体とし、正方形断面の1辺が5, 15, 30mmの3種類で高さは全て90mmとした。造形後、ワイヤー放電加工機により造形

プレートから高さ30mm及び60mmの位置で切断した。造形材料はSUS316L及びAlSi10Mgの2種類を使用した。

造形条件の評価に用いられるエネルギー密度 E は、式(1)に示すようにレーザー出力 P を走査速度 v 、走査ピッチ w 、積層厚 h で除した単位体積あたりの投入エネルギー量を表している。造形条件は標準造形条件を基に、走査速度 v を変えて造形した。表2に造形条件の一覧を示す。

$$E = \frac{P}{vwh} \quad (1)$$

造形状態の評価には、アルキメデス法により測定した造形物の密度を用いた。また、造形高さの変化に伴う粉末床の温度変化を見るため、放射温度計 CALEX 社製 PM-HA-201-CT-CRT を造形機に据え付け、造形中の粉末床中央(1点)の温度を測定した。

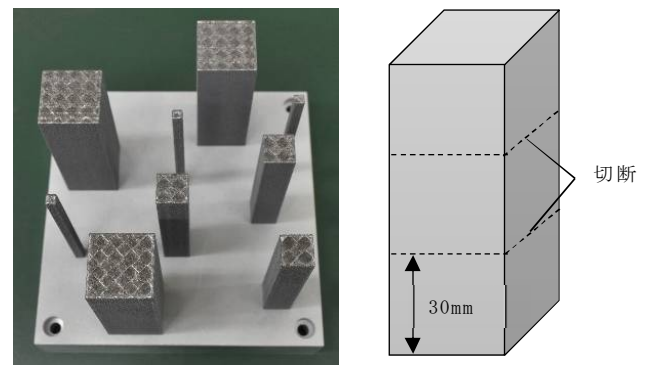


図4 造形寸法の異なるサンプル

表2 造形寸法及び造形高さの影響調査に用いた造形条件

造形材料	造形条件	P [W]	v [mm/sec]	w [mm]	h [mm]	E [J/mm ³]
SUS316L	S-1	200	600	0.105	0.03	106
	S-2		800			79
	S-3		1000			63
AlSi10Mg	A-1	376	1300	0.105	0.03	92
	A-2		1500			80
	A-3		1700			70

3. 実験結果

3・1 数値シミュレーション結果

造形中の熔融凝固の際に生じる残留応力は、造形物の反りや欠陥などの造形不良の要因の一つである。そこで数値シミュレーションによる解析結果のうち、残留応力を評価指標とし、高温物性値の考慮の有無による違いを検証した。残留応力の解析結果を表3に示す。マルエージング鋼の実際の造形で高い相対密度が得られる標準造形条件は、造形条件1に示すレーザー出力 P 200W、走査速度 v 800mm/sec、エネルギー密度 E 79J/mm³である。

まず1100°Cまでの高温物性値を用いた解析結果では、エネルギー密度 E が不足している条件2、並びに過剰な条件3に比べ、標準造形条件1では造形物に生じる残留応力が

低かった。それに対し、室温物性値のみを定義した解析結果は、実造形の標準造形条件よりも走査速度 v の遅い、つまりエネルギー密度 E の高い条件 3 の残留応力が最も低かった。また、条件 2 よりもさらにエネルギー密度 E の低い条件 4, 5 では、高温物性値の考慮の有無に関わらず、残留応力はほとんど発生していないが、造形物の温度が融点を超えておらず造形はできないと推測される。しかし、実際の造形では相対密度は低いものの、条件 4, 5 でも造形は可能であることから、数値シミュレーションでは、実造形を完全に再現できないことには注意が必要である。

以上より造形材料の高温物性値を考慮した解析と、それを室温物性値のみで一定とした解析とでは残留応力に大きな差異が生じていることが分かる。また、実造形で高い相対密度が得られる造形条件と、材料の高温物性を考慮した解析結果で残留応力の低い造形条件が一致していることから、残留応力の解析結果に着目することで、適切な造形条件の検討が可能であることが示唆された。これらのことから、熔融から凝固まで幅広い温度域が対象となる金属積層造形の数値シミュレーションでは、高温物性値を考慮することで実現象をより正確に再現できる可能性があると考えられる。

表 3 解析結果(残留応力)

造形条件	P [W]	v [mm/sec]	E [J/mm ³]	解析結果 [MPa]	
				室温物性値のみ	高温物性値あり
1	200	800	79		
2	150	1000	48		
3	200	500	127		
4	100	800	40		
5	200	2000	32		

3・2 実造形による相対密度に及ぼす造形寸法の影響

図 4 に示すサンプル造形中の粉末床上面中央の温度を図 5 に示す。造形開始後に粉末床温度が上昇し、AlSi10Mg は 300min で 57℃となり、造形終了まで大きな温度変化はなかった。一方、SUS316L は同じく 300min で 53℃まで上昇し、その後は緩やかに上昇し続け、造形終了時には 65℃であった。このように造形開始時に比べ粉末床温度は上昇しており、熔融に必要なエネルギー量はそれに伴い減少する。本サンプルは直方体形状だが、実際の造形形状は複雑で高さによって造形面積が異なるため、粉末床温度も高さに応じて変化すると推察される。適切な造形条件を設定するためには、粉末床温度の考慮が重要であると考えられる。

走査速度 v と造形物の相対密度の関係を図 6 に示す。いずれの造形材料も造形寸法が大きいほど相対密度が高く、SUS316L に比べて AlSi10Mg は造形寸法の違いによる差異が大きかった。レーザーは走査ピッチ毎に、既熔融部をオーバーラップしながら照射するが、造形物側面は熔融部と粉末床の境界部となるため、空孔が生じやすく表面粗さも粗くなりやすい傾向にある。よって体積に対する表面積の割合の小さいサンプルの相対密度が高くなったと推察される。造形寸法の小さい 5mm のサンプルにおいて、走査速度 v の速い条件で相対密度が高くなる傾向があったのは、走査速

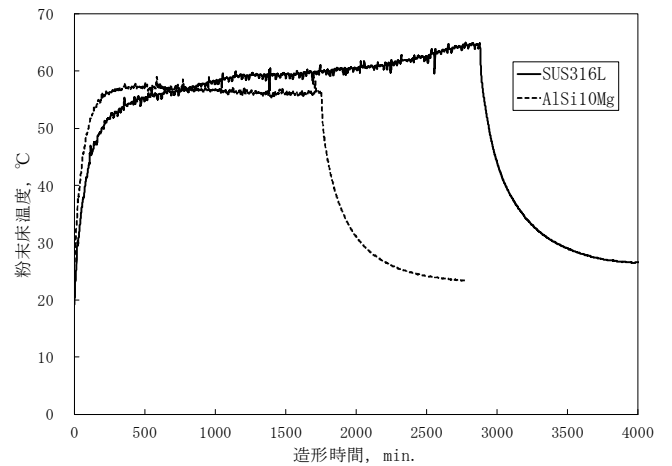


図 5 造形中の粉末床上面中央の温度

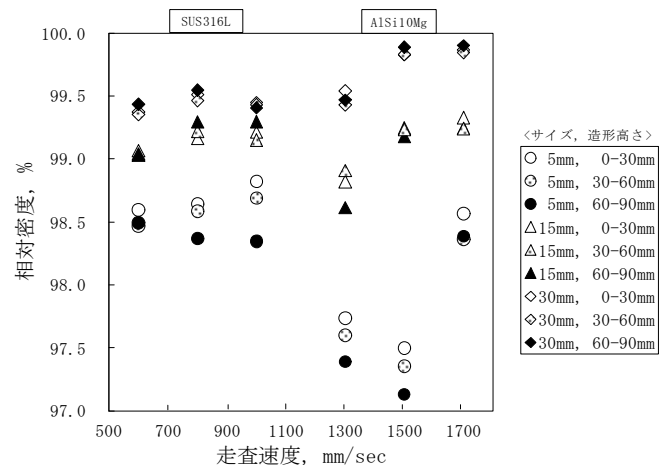


図 6 走査速度と相対密度の関係

度 v が速いほどメルトプールの幅は狭くなり、造形物側面の熔融境界部の範囲が狭かったためと考えられる。アルキメデス法による評価は内部欠陥が加味されないため、表面状態の差異が顕著に表れると考えられる。

また、造形寸法 5mm のサンプルでは、いずれの造形材料も造形高さの低いサンプルの相対密度が高かった。これは図 5 から分かるように、造形初期は粉末床温度が低いことや、造形プレートからの距離が近いほど抜熱が促されることにより、加熱による粉末の余分な熔融が少なかったためと考えられる。このことより、造形時の抜熱が重要と考えられる。

4. 結 言

本研究では、造形条件設定の指針の確立に向けて、数値シミュレーションを用いて造形材料の高温物性値の影響を調査した。また、造形時に生じる熱に着目し、造形物の寸法や高さが造形状態へ及ぼす影響について、二種の造形材料を用いて実際に造形することにより調査した。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 数値シミュレーションにおいて、材料の高温物性を考慮した場合の残留応力が低くなる造形条件と、実造形で高い相対密度が得られる造形条件は、一致していた。
- (2) 数値シミュレーションによる残留応力の解析結果に着目することで、実際の造形物の相対密度の傾向が推測でき、適切な造形条件の検討が可能であることが示唆された。

- (3) SUS316L および AlSi10Mg のいずれの造形材料も造形寸法が小さいほど相対密度は低くなることが分かった。また、造形寸法の小さい 5mm のサンプルでは、造形高さの低いサンプルの相対密度が高かった。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター:金属積層造形プロセス分野の技術戦略策定に向けて, TSC Foresight, **32**(2019).
- 2) 京極秀樹ほか:型づくりと金属 AM(付加製造)の最新動向, 型技術, **35**(8), p.18-75(2020).
- 3) 池庄司敏孝:レーザ積層造形における熔融・凝固現象, スマートプロセス学会, **6**(3), p.109-114(2017).
- 4) 池庄司敏孝:レーザ式粉体床熔融法の熔融凝固数値解析における粉体床へのレーザ入熱の ANSYS MAPDL による実装, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, **10**, p.103-110(2019).
- 5) 森山三千彦, 高木節雄, 徳永洋一:18%Ni マルエージング鋼の時効硬化挙動と疲労特性, 材料, **43**(492), p.1106-1112(1994).
- 6) 杉山健二, 高林宏之, 植田茂紀:超強靱鋼の機械的特性および組織におよぼす Al, V の影響, 大同特殊鋼技報 電気製鋼, **87**(2), p.75-83(2016).
- 7) 梅森直樹, 堀尾浩次, 増田哲也:ダイカスト金型用肉盛り溶接棒 “DHW”, 大同特殊鋼技報 電気製鋼, **85**(1), p.63-70(2014).