

積層造形物の変形抑止法に関する研究：熱構造連成解析による変形挙動の考察

著者	菱田 貴一, 古本 達明, 橋本 洋平, 小谷野 智広, 細川 晃
著者別表示	Hishida Kiichi, Furumoto Tatsuaki, Hashimoto Yohei, Koyano Tomohiro, Hosokawa Akira
雑誌名	精密工学会学術講演会講演論文集
巻	2016 Spring
号	G75
ページ	551-552
URL	http://doi.org/10.24517/00052926

doi: 10.11522/pscjspe.2016S.0_551



積層造形物の変形抑止法に関する研究

- 熱構造連成解析による変形挙動の考察 -

金沢大学大学院 ○菱田貴一, 金沢大学 古本達明, 橋本洋平, 小谷野智広, 細川晃

Study on reduction of deformation obtained by selective laser melting

- Investigation of deformation behavior by thermal-structure interactive analysis -

Graduate school of National Science and Technology, Kanazawa University Kiichi HISHIDA,

Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

Tatsuaki FURUMOTO, Yohei HASHIMOTO, Tomohiro KOYANO, Akira HOSOKAWA

Key words: additive manufacturing, thermal deformation, thermal-structure interactive analysis

In our previous study, it was shown that the direction and scale of thermal deformation obtained by selective laser melting were different in consolidated structure or base plate. In this study, a two-dimensional finite element model was built using ANSYS, and the thermal-structure interactive analysis was carried out to estimate the temperature distribution and deformation behavior of the model. As results, the convex direction was different in the combination of metal powder and base plate, and the calculated results obtained coincided well with the experimental results. Furthermore, the deformation direction of consolidated structure was influenced with the coefficient of thermal expansion and Young's modulus of consolidated structure.

1. 緒言

3次元CADが発達し、作成したデータから直接立体形状を製作できる積層造形法が開発された。当初は試作品の製作が主な適用例であったが、材料が光硬化性樹脂に加えて金属やセラミックも使用できるようになり、現在では製造業や医療分野等にも適用範囲を広げている。本研究では積層造形法の中でも薄い金属粉末層にレーザーを照射し、熔融・固化した層を何層も積み上げることで立体形状を得る粉末床溶融結合法に焦点を当てた。この手法は、幾何学的に自由な冷却水管を備えた金型を造形可能など、複雑形状品にも対応する。しかしながら、レーザー照射により、造形物に熱変形が生じ、結果として寸法精度の悪化をもたらす¹⁾。

本研究では、有限要素法を用いて熱構造連成解析を実施し、造形物に生じる温度分布の推定及び変形予測を行った。また、実際に実験モデルに生じる反り現象と比較を行い、反りに影響を与える因子を調べ、造形物の変形挙動を詳細に考察した。

2. 熱構造連成解析

汎用構造解析ソフトウェア ANSYS16.0(ANSYS Inc.)を使用した。図1に解析モデルを示す。金属粉末は、SCM ベース混合粉末(以下、SCM)とマルエージング鋼ベース混合粉末(以下、MAS)、プレートはS50Cを使用した。解析では簡単のため2次元モデルを採用したが、実際の実験モデルでは奥行きが5mmの3次元モデルとした。

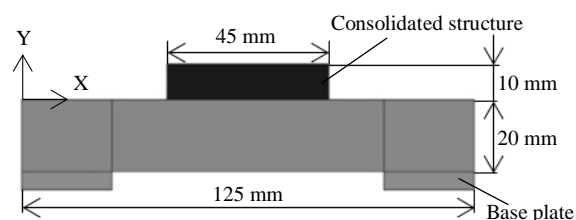


Fig.1 Experimental setup for thermal-structure interactive analysis

2.1 伝熱解析手法

造形中のモデルに発生する温度分布を推定するため、伝熱解析を行った。解析で用いた条件を表1に示す。結合物上部に熱流束を移動熱源として与え、一定の冷却時間をもってモデルの温度変化を調べた。粉末に覆われる部分は断熱状態とし、結合物上部およびプレート底面は放熱されるものとし熱伝達を与えた。なお、実際の造形中にKタイプ熱電対を結合物とプレートの境界から2mm下部に3箇所挿入してモデルの温度を測定し²⁾、解析から得られた温度と整合性を確認した。

2.2 構造解析手法

粉末床溶融結合法で生じる反りを表現するため、前節で得られたモデルの温度分布を温度荷重とし、熱応力解析を行った。プレートの両端部は上下左右に変位を生じないように拘束を与えた。要素の変位からモデルの反り量を算出すると共に、応力分布図を求めた。実際の実験モデルでは、プレート裏面のプロファイルをレーザー変位計で測定し、反り量を求めて、構造解析結果と比較した。

Table1 Conditions for thermal analysis

	SCM	MAS
Initial temperature [°C]	27	
Irradiation time [sec]	16.2	8.4
Cooling time [sec]	16	
Heat flux [W/m ²]	2.0 × 10 ⁷	3.5 × 10 ⁷
Heat transfer coefficient [W/m ² ·K]	1.0 × 10 ³ (top surface)	
	1.0 × 10 ⁵ (bottom surface)	
Element size [mm]	0.5	

3.1 伝熱解析

図 2(a)に SCM 粉末における加熱時の温度分布, 図 2(b)に MAS 粉末における加熱時の温度分布を示す。図 2 はどちらも熱流束が結合物中央に与えられた図であり, 熱流束を与えた領域でモデルは最高温度を示し, 熱伝導によってモデル全体に温度が拡散していることが分かる。ここで伝熱解析結果と実際の実験時の温度測定結果の時刻歴応答を比較した一例として, SCM 粉末におけるモデル中央部の温度変化を図 3 に示す。図のように, 解析での温度と実験での温度が一致した。

3.2 構造解析

図 4, 図 5 はそれぞれ, SCM 粉末および MAS 粉末を使用するとき, 加熱時と冷却時の Y 方向変位を示している。また, 各粉末を造形した後の反り量を図 6 に示す。ここで, 反り量は下に凸の変形を正, 上に凸の変形を負とした。加熱時の Y 方向変位は, 図 4 に示すようにいずれの粉末でもレーザー照射部近傍が最高温度であり, 温度分布に起因して膨張するため, モデルは上に凸の方向に変形した。一方, レーザ照射が終了してモデルが冷却されると, SCM 粉末では図 5(a)に示すように下に凸の方向に変形するのに対して, MAS 粉末は図 5(b)に示すように上に凸の変形となった。これらの変形方向は, 実験で得られた結果とよく一致していた。

各粉末で変形方向が異なる原因を調べるため, 冷却後の X 方向応力を調べた結果を図 7 に示す。SCM 粉末を用いたとき, 図 7(a)に示すようにプレート上方の結合物外側に大きな圧縮応力が生じていることが分かる。SCM 粉末でプレート下面が下に凸の方向に変形したのは, これらの圧縮応力が原因であると考えられる。一方, 図 7(b)に示す MAS 粉末を用いた場合では, プレート上方の結合物外側に圧縮応力が生じたのは SCM 粉末の結果と同様であったが, その領域は小さかった。加えて, MAS 粉末では結合物下部のプレートとの境界付近にも圧縮応力が生じていた。粉末種類による圧縮応力場の違いは, 各粉末の線膨張係数が異なることに起因していると考えられる。線膨張係数は, MAS 粉末, ベースプレート, SCM 粉末の順に大きくなる²⁾。そのため, SCM 粉末ではプレートの伸びに対する結合物の伸びが相対的に大きく, MAS 粉末よりも圧縮応力が大きくなったと考えられる。

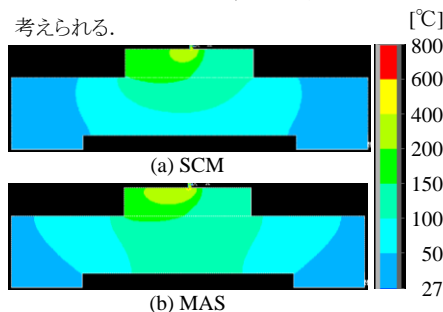


Fig.2 Temperature history during heating process

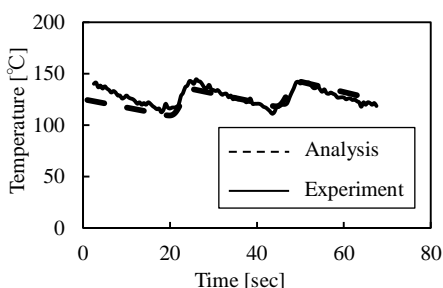


Fig.3 Temperature history during consolidation process

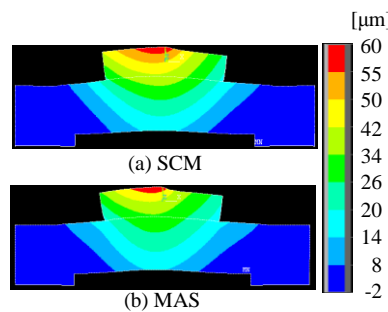


Fig.4 Y-component of displacement during heating process

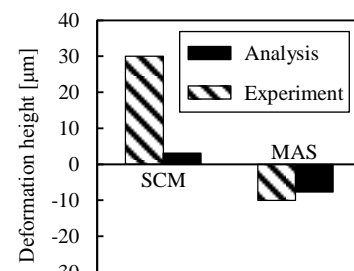


Fig.6 Effect of consolidated structure on deformation

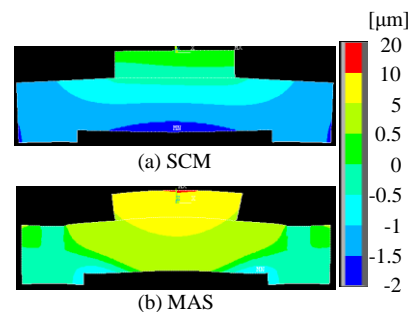


Fig.5 Y-component of displacement during cooling process

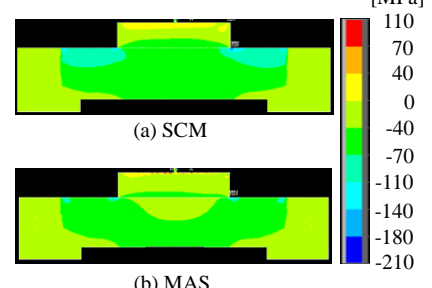


Fig.7 X-component of stress during cooling process

3.3 変形メカニズム

これらの解析結果から, 粉末床熔融結合法によるモデルの変形機構は以下になる。まず加熱時は, レーザ照射に起因してモデル上面ほど高温になるため, モデルの熱膨張に起因して上に凸の変形となる。このとき, 温度上昇に伴ってモデルの降伏応力が低下するため, 内部には圧縮の塑性ひずみが生じる。レーザー照射が終了して冷却過程になると, 冷却に起因してモデルは収縮するが, プレートと結合物の相関で変形挙動に違いが生じる。熱応力は, 線膨張係数, ヤング率, 温度の積によって求めることができるが, 結合物とプレートに生じる熱応力の違いが変形方向に影響を及ぼす。SCM 粉末を用いた場合, これらの積は MAS 粉末の場合よりも大きく, その結果として冷却後に下に凸の変形となった。一方, MAS 粉末の場合は SCM 粉末のそれより小さく, 加熱時の変形方向が維持され上に凸の変形となった。

4. 結言

得られた結果を以下に示す。

- (1) 伝熱解析により, SCM 粉末および MAS 粉末の造形時におけるモデル内部の温度分布を推定した。
- (2) 構造解析により, モデルは加熱時に結合物の種類に依らず上に凸の方向に変形し, 冷却時に SCM 粉末のときは下に凸の方向に変形し, MAS 粉末のときは上に凸の方向に変形した。
- (3) 変形に大きく影響を及ぼす因子は各材料の線膨張係数とヤング率であり, プレートと結合物の各値との相関から変形方向が決まる。

5. 参考文献

- 1) J.P.Kruth et al. : Selective laser melting of iron-based powder, Journal of Materials Processing Technology 149(2004) 617
- 2) 古本達明, 小倉諒士, 小谷野智広, 細川晃 : 積層造形金型の変形抑制法に関する研究 -熱物性がプレート変形に及ぼす影響-, 2014 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集