

B04 金属 3D プリンターを用いた積層造形時における 残留応力に関する力学的検討

貝ヶ石 康平 (指導教員 柴原・生島・河原)

Study on Residual Stress during Selective Laser Melting using 3D printer

by Kohei Kaigaishi

Abstract

Recently, 3D printer technology has been attracting attention in a wide range of industries such as mold, automotive, aviation and medical fields because it can form complex shape by a simple method. In particular, 3D printer using metal powder is expected as a core technology of new product manufacturing. However, advancing control techniques for deformation and stress is necessary because crack and deformation may occur after or on the forming. To predict the deformation and stress on the forming, FEM is considered to be an effective tool and it can be useful for solving the problem in the product manufacturing process by metal 3D printer.

In this research, by introducing Idealized Explicit FEM, which can perform large-scale analysis, stress behavior on the metal 3D printing is investigated. Furthermore, the influence of various factors on the stress behavior during metal 3D printing was discussed.

1. 緒 言

近年、金型や自動車、航空、医療など幅広い産業分野において、3次元の造形を行うことが出来る3Dプリンター技術が注目されており、世界各国で研究開発が進められている。特に、金属粉末を熔融・凝固させることで1層ごとに積層造形を行う技術は、切削、鋳造といった従来の加工法では製作不可能な形状を製作することが可能であり、新しい製造の基盤技術として期待されている⁽¹⁾。しかし、金属3Dプリンターの積層造形には、変形・割れ等の高度な制御技術が要求され、モニタリング技術やフィードバック制御技術、シミュレーション技術の開発が必要とされている。特に、有限要素法 (Finite Element Method : FEM)による熱弾塑性解析⁽²⁾は、複雑形状の成形中の変形や応力の挙動を詳細に予測できることから、金属3Dプリンターによる製品の製造工程における問題解決に対しても非常に有効な手段であると考えられる。

金属3Dプリンターによる積層造形では、一層当たりの造形厚さが $100\mu\text{m}$ 程度であり、高さ 100mm の造形物に対して約1,000層の積層が行われることから、FEMによる熱弾塑性解析では解析モデルの要素数が増加し、解析規模が膨大なものになってしまうため、層数の多いモデルについて解析を行うことは困難である。そこで、本研究では、高速かつ省メモリな解析手法である理想化陽解法 FEM⁽³⁾に注目する。理想化陽解法 FEM⁽⁴⁾を基に開発された手法であり、従来手法である静的陰解法 FEM とほぼ同等の解析精度を有し、かつ、大規模問題において高速かつ省メモリな点に特長を有する。本手法は従来手法と比べ、要素数および積層数の多い積層造形モデルの解析に対して有効であると考えられる。

以上のように、高速かつ省メモリな大規模熱弾塑性解

析手法である理想化陽解法 FEM を用いて、本研究では、金属3Dプリンターによる積層造形時における応力の挙動について検討する。解析においては、種々の入熱方法、拘束条件を仮定し、各々の因子が積層造形時の応力挙動に及ぼす影響について議論する。

2. 金属 3D プリンターの積層造形の概要

現在、3Dプリンターに代表される3次元造形方法のうち、多くが樹脂を材料として使用しており、金属を材料として使用できる造形方法は限られている⁽⁵⁾。Fig.1に金属積層造形の際に用いられる主要な方法の一つである粉

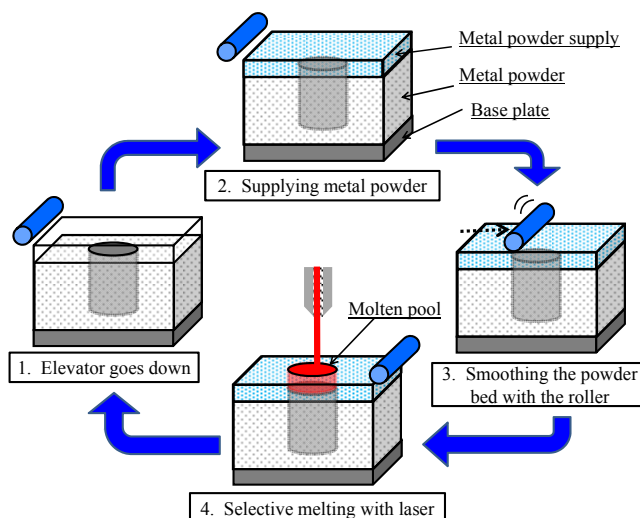


Fig. 1 Concept of powder bed fusion using laser melting.

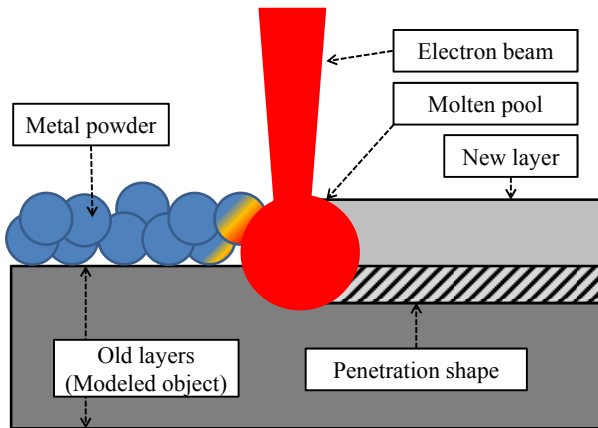


Fig. 2 Schematic illustration of EBM process.

粉末床溶融積層法（Powder Bed Fusion）の概略図を示す。最初に、造形を行う基盤となるベースプレートをエレベータに設置する。その後、Fig. 1 に示すようにベースプレート上に金属粉末を供給し、ローラブレードによって金属粉末を薄く均す。造形領域に予熱を加えた後、金属粉末をレーザ等の熱源で選択的に溶融させて表層の造形を行う。以上が一層分の造形プロセスであり、一層の造形終了後、エレベータを 1 層の積層厚さ分だけ下降させ、次層の造形に移行する。これを繰り返すことで積層造形を行う。実際の製造工程では、積層造形が終了した段階で、徐冷した後、取り出して粉末除去および研磨等の後加工を行う。以上の造形プロセスにおいて、熱源として電子ビームを用いたものは電子ビーム積層造形法（Electron Beam Melting: EBM）と呼ばれる。Fig. 2 に EBM を用いた積層造形時の溶融プロセスの概略図を示す。同図に示すように、熱源によって溶融された金属粉末は、溶融池を形成して下層の表面を溶融させ、新しい層と古い層が接合される。したがって EBM は、レーザ接合の一種として考えることが出来る。

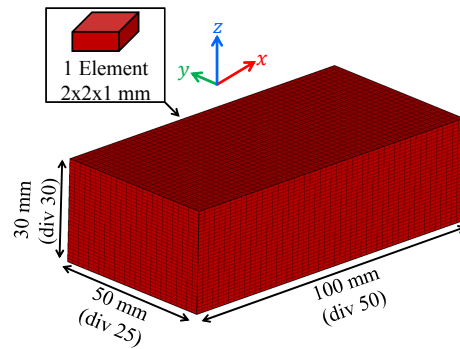
3. 簡易形状造形の解析

金属 3D プリンターの積層造形において、層がいくつも重なるようなモデルに熱弾塑性解析を適用する事例は、解析規模の観点から行われていない。そのため、積層造形時の力学的挙動についての基礎的検討が必要である。そこで、基礎モデルとして直方体の造形を対象とし、種々の入熱方法、拘束条件を仮定した積層造形時の応力挙動の解析を適用し、残留応力に関する力学的検討を行う。

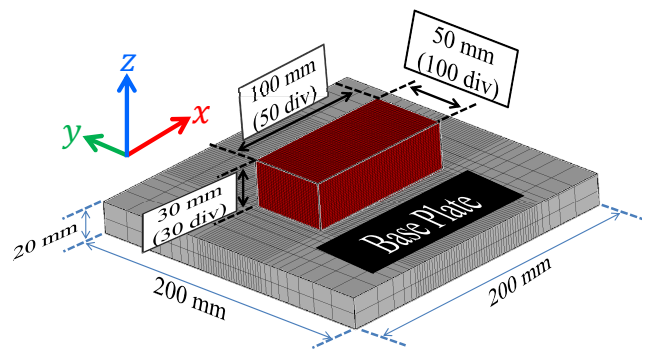
3.1 解析モデルおよび解析条件

本検討で使用した解析モデルを Fig. 3 に示す。同図(a)は直方体のみを対象としたモデルであり、(b)はベースプレートまでモデル化している。造形物の寸法は、長さ 100 mm、幅 50 mm、高さ 30 mm の直方体とし、1 要素当たりの寸法は長さ 2 mm、幅 2 mm、高さ 1 mm した。節点数は 41,106、要素数は 37,500、積層数は 30 とし、1 層当たりの厚さは 1 mm としている。プレート付き直方体モデルは、長さ 200 mm、幅 200 mm、高さ 20 mm のベースプレートの中央に直方体モデルを造形する。

拘束条件に関して、積層造形は、平板のベースプレート上に積層していくことを想定しているため、直方体モデルでは直方体の裏面を全拘束し、ベースプレート付き直方体モデルではベースプレート裏面を全拘束して解



(a) Cuboid model.



(b) Cuboid model with base plate.

Fig. 3 Analysis model.

析を行う。また、積層の終了後、ベースプレートから取り外すプロセスも解析において考慮した。

次に入熱条件に関して、積層方法は電子ビーム積層造形を想定した 1500 W、積層速度 22 mm³/sec、とし、単位体積当たり同じ入熱量となるように調整した。各層において、最大温度が 100℃まで冷却した後、次の層の造形へ移行するものとした。造形対象物およびベースプレートの材質には SM490 材を仮定した。

3.2 ベースプレートの有無による影響

Fig. 4 にベースプレートを考慮した直方体モデルの中央断面における x 方向応力分布を示す。同図(a)は 10 層目、

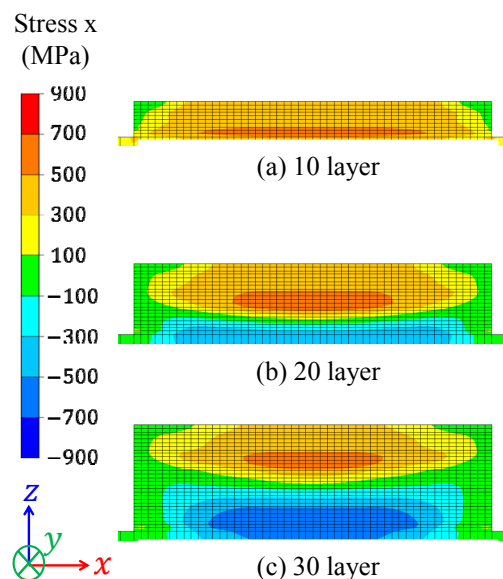


Fig. 4 Stress in X direction on central plane of cuboid attached

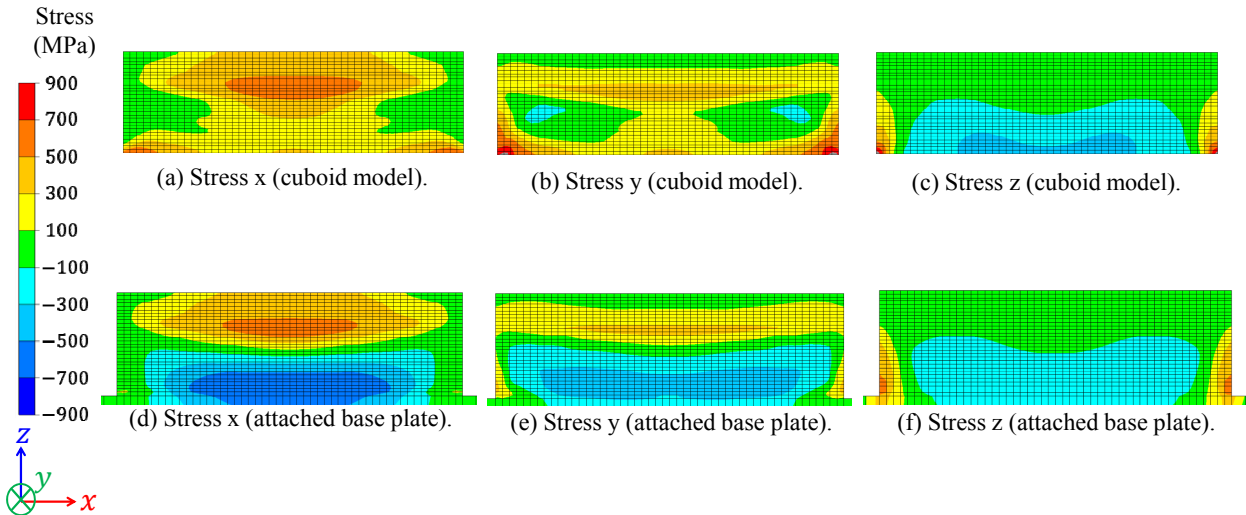


Fig. 5 Comparison of residual stress distribution on x-z cross section between with and without base plate.

(b)は20層目, (c)は30層目の造形時をそれぞれ表す。なお, 熱源モデルは計算負荷が少ない面熱源で解析を行った。同図に示すように, 表層から下の10層程度は引張応力が発生し, それよりも下の層では圧縮応力が発生していることが確認できる。また, 積層数が増えるにつれ, 初層近傍の圧縮応力は大きくなることが分かる。

Fig. 5 に30層造形終了時のy方向中央断面(x-y)における応力分布の比較を示す。同図(a)に直方体モデルにおけるx方向応力分布を示し, 同様に, (b)にy方向応力分布, (c)にz方向分布をそれぞれ示す。同図(d)にベースプレートを考慮した直方体モデルにおけるx方向応力分布を示し, 同様に(e)にy方向応力分布, (f)にz方向応力分布をそれぞれ示す。同図(a)と(d)を比較すると, 直方体モデル

では, 初層近傍に引張応力が生じているが, ベースプレートを考慮したモデルでは, 圧縮の応力が残っており, 残留応力の傾向が異なる。最終層近傍ではベースプレートへの熱伝導の影響が少なくなるため, 同じ残留応力の傾向を示し, 最終層より10層ほど低い位置の中心に引張の応力が発生していることが分かる。したがって, 初層近傍においてベースプレートの有無の影響が顕著に表れていると言える。同図(b), (e)を(a), (d)の最大の引張応力および最大の圧縮応力を比較すると, x方向応力の方が大きいことが分かる。これは直方体モデルの積層造形において, 長手方向の応力の方が大きくなることが考えられる。同図(c), (f)を比較すると, z方向の応力の傾向は同じであり, 造形物とベースプレートの境界の端部に引張応力が発生することが確認できる。

Fig. 6 にモデル別の30層造形時および拘束除去時のA-A'上におけるx方向応力分布を示す。△印および▲印は, 直方体モデルにおける30層が終了した時および剛体拘束に変更した時のx方向応力分布を示す。○印および●印は, ベースプレートを考慮した直方体モデルにおいて30層が終了した時および剛体拘束に変更した時のx方向応力分布を示す。同図より, 30層造形時の応力は, ベースプレート有無の影響によって, 初層付近で大きく異なっていることが分かる。しかし, 剛体拘束に変更すると, 直方体モデルのx方向応力が低下し, ベースプレートを考慮したモデルのx方向応力分布とおおよそ一致す

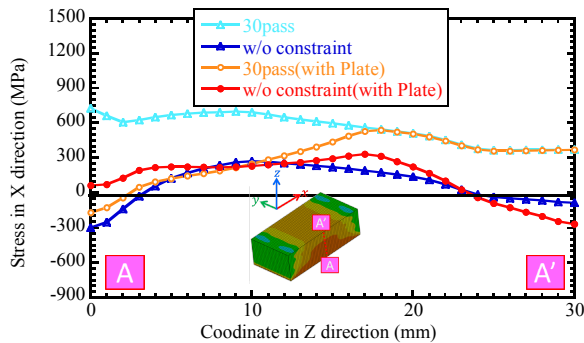


Fig. 6 Stress in X direction on A-A' line.

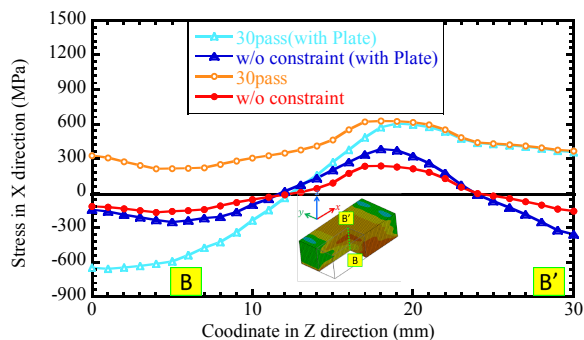


Fig. 7 Stress in X direction on B-B' line.

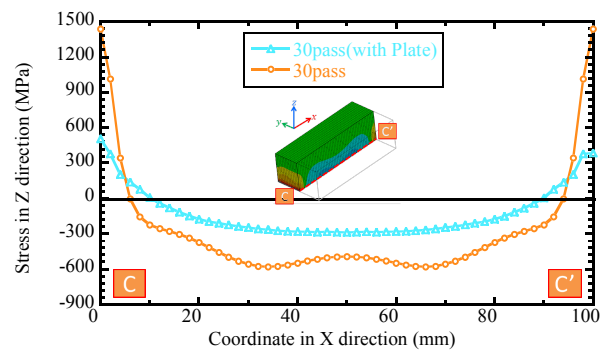


Fig. 8 Stress in Z direction on C-C' line.

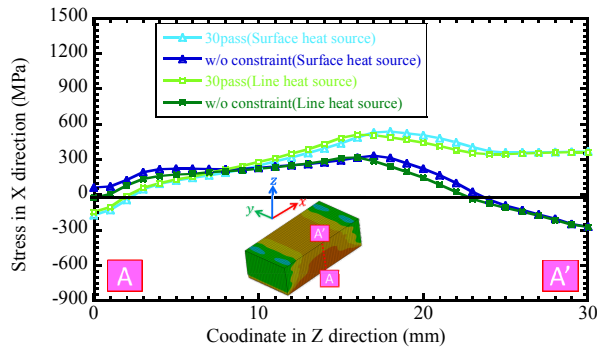


Fig. 9 Stress in X direction on A-A' line.

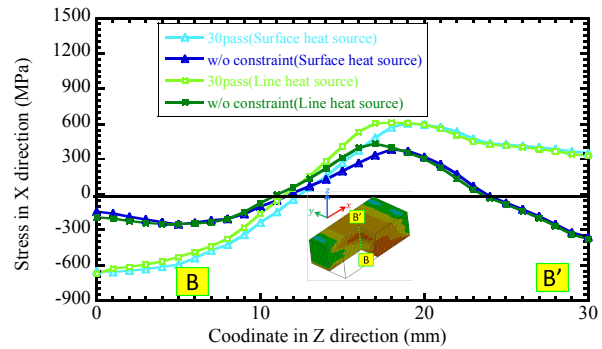


Fig. 10 Stress in X direction on B-B' line.

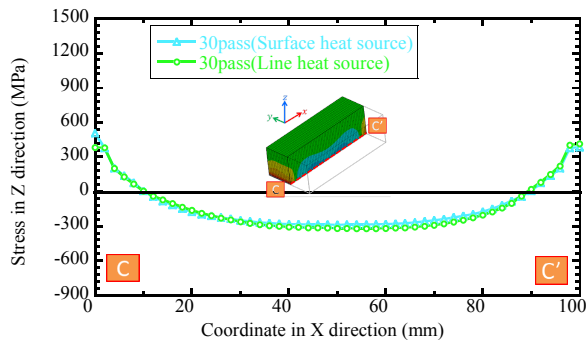


Fig. 11 Stress in Z direction on C-C' line.

ることが分かる。

Fig. 7 にモデル別の 30 層造形時および拘束除去時の B-B' 上における x 方向応力分布を示す。同図より、造形物内部においても、剛体拘束に変更すると、直方体モデルの x 方向応力が、ベースプレートを考慮したモデルの x 方向応力分布とおおよそ一致することが分かる。

Fig. 8 にモデル別の 30 層造形時の C-C' 上における z 方向応力分布を示す。同図より、造形物の中央部に圧縮応力、外側に引張応力が発生していることが分かる。直方体モデルの z 方向応力はベースプレートを考慮したモデルと比較して、大きくなっており、特に端部には突出して大きい引張応力が発生していることが確認できる。

以上より、過渡の応力を評価する場合には、温度履歴が変わらないようにベースプレートの考慮は必須であるものの、剛体拘束に変更すると残留応力の傾向がおおよそ一致することが分かる。

3.3 異なる熱源による影響

金属 3D プリンターの各層における入熱は、面熱源ではなく移動熱源である。そこで、面熱源および移動線熱源について解析を行い、残留応力に関する検討を行う。本検討では、解析モデルとして Fig. 3(b)に示すベースプレートを考慮した直方体モデルを用いた。解析において、移動熱源は移動速度 5 mm/sec とした。

Fig. 9 に熱源モデル別の 30 層造形時および拘束除去時の A-A' 上における x 方向応力分布を示す。△印および▲印は、面熱源モデルにおける 30 層が終了した時および剛体拘束に変更した時の x 方向応力分布を示す。○印および●印は、移動熱源において 30 層が終了した時および剛

体拘束に変更した時の x 方向応力分布を示す。同図より、x 方向応力について面熱源モデルと移動熱源モデルでは応力分布は一致していることが確認できる。

Fig. 10 に熱源モデル別の 30 層造形時の B-B' 上における x 方向応力分布を示す。同図より、造形物の中央部においても、応力のピーク位置が 2 mm 程度異なるものの、全体の傾向としては一致していることが分かる。

Fig. 11 に熱源モデル別の 30 層造形時の C-C' 上における z 方向応力分布を示す。同図より、z 方向応力について面熱源モデルと移動熱源モデルで応力分布が良く一致していることが分かる。

以上より、金属 3D プリンターの積層造形時における残留応力について評価する場合、面熱源の入熱方法であっても、傾向を掴むことが可能であることが分かった。

5. 結 言

本研究では、金属 3D プリンターの積層造形時における入熱方法、拘束条件、各々の因子が積層造形時の応力挙動に及ぼす影響について検討を行った結果、以下のような知見が得られた。

- 1) ベースプレートを取り付けることで、初層近傍の温度分布が大きく変わるため、過渡応力を検討する際には、ベースプレートを考慮する必要があることが分かった。
- 2) 積層造形時の残留応力について検討を行う場合、面熱源の解析でもその傾向を掴めることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 京極秀樹：金属粉末レーザ積層造形技術の進展，溶接学会誌，第 83 巻(2014)第 4 号，pp.16-19.
- 2) 上田幸雄，山川武人：有限要素法による熱弾塑性挙動の解析，溶接学会誌，vol.42-6(1973)，pp.567-577.
- 3) 生島一樹，柴原正和，伊藤真介，正岡孝治：理想化陽解法 FEM による溶接力学解析法の開発，溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集 (2009)，pp.509-516.
- 4) 矢川元基：構造工学ハンドブック，丸善(2004)，302.
- 5) 新野俊樹：積層造形技術—ラピッドプロトタイプングからラピッドマニュファクチャリングへ，精密工学会誌，vol.76，No.12，2010，pp.1340-1344.