

令和 6 年 4 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05113

研究課題名（和文）積層溶融型3Dプリント複合材の粒子法を用いた成形シミュレーション

研究課題名（英文）Fused filament fabrication 3D printed composite simulation using particle method

研究代表者

轟 章（Todoroki, Akira）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50211397

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、短炭素繊維で強化された複合材料の3Dプリンティングが機械構造に使用されています。しかしながら、これらの3Dプリントの成形では、成形パス間に大きな空白が含まれる場合があります。これらのポイドの生成プロセスを理解するために、本研究では粒子法（半陰的法によるMPS法）を用いた短炭素繊維強化複合材料の成形プロセスシミュレーションを扱った。新規複合粒子を示し、熱可塑性樹脂の潜熱を考慮した溶融・融合過程のシミュレーションを実現した。得られた結果は実験結果と比較され、優れた一致を示しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

繊維を含まない熱可塑性樹脂の3Dプリントに関しては、成形温度やノズルスピードなどの条件を変えて強度を評価する研究は数多く実施されている。これらの研究では、溶融フィラメントの密着性に着目した実験的研究が主眼である。複合材3Dプリントシミュレーションに関しては、市販ソフトが有限要素法で残留応力解析を実施している。このソフトでは樹脂溶融は解析せず、ポイド率解析は実験値からの推定になっている。樹脂溶融を含めた3Dプリント複合材のシミュレーションは国内外で行われていない。繊維の体積含有率を実際と同じにする解析は世界初の試みであり、複合材3Dプリントのポイド削減に大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：3D printing of short carbon fiber composites are used for mechanical structures recently. The printing, however, sometimes includes large void between printing paths. In order to understand the void nucleation process, the present study deals with the printing process simulation using moving particle semi-implicit method. The paper shows the novel composite particles and realizes the simulation of melting and fusion process with considering latent heat of the thermoplastic resin. The result obtained is compared with the experimental result and shows excellent agreement.

研究分野：複合材料

キーワード：複合材料 3Dプリンタ 樹脂流動 粒子法

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料 (CFRP) は軽量・高強度・高剛性であることから輸送機器構造材料に多用されつつある。2015 年から、連続繊維強化の複合材 3D プリントが市販されるようになった (<http://www.markforged.jp/>)。金属 3D プリントと比較して、格安で金属とほぼ同等の強度・剛性が達成されるため、複合材 3D プリントは経済的な優位性を有している。現状の 3D プリントは、細長いフィラメント樹脂をノズル内で溶融させて二次元でプリントし、それを積み重ねていくことで 3 次元の製品を作成する FFF (Fused Filament Fabrication) 方法が主流で、市販の複合材 3D プリントはこの FFF 方式に繊維束カッターを付加したものを採用している。

著者らは世界初のこの複合材 3D プリントで作成した一方向 CFRP 試験片で、ポイドが 10% 程度に及ぶことを報告している (F. van der Klift, et. al. 2016, Open J. of Compo. Mater., 6)。市販品においても、現状は連続炭素繊維に適した成形条件ではないことが明らかである。

今後の材料や成形寸法などの条件変化の可能性を考慮すると、成形条件の最適化には成形シミュレーションの開発が不可欠である。樹脂の 3D プリントのシミュレーションでは、有限要素法を用いた市販品がある (Talagani et al., 2015, SAMPE J.)。これは製品を要素分割するため、樹脂流動解析はできない。Makino らは粒子法の一つである SPH 法を用いた成形シミュレーションを実施している (Makino et al., 2017, 23, Microsyst. Tech.)。SPH 法では熱伝導の異方性などの拡張が困難であり、樹脂溶融の高い精度の解析にはエンタルピーの陰解法も追加が必要である。また、温度で凝固・溶融の判定を実施しており、潜熱の影響は考慮されていない。粒子法には、圧力項の計算を陰的に行う半陰解法の MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit 法) も存在する。MPS 法は複合材料の成形シミュレーションに既に使われている (志野ら, 2016, T.JSCES, 20160015), (矢代ら, 2016, 36-1, 複合材学会誌)。これらは繊維と樹脂を別の粒子で表現しており、現実の 3D プリント過程を計算することは規模的に困難である。以上から、実用的な複合材粒子を用いた異方性解析に対応可能な手法でエンタルピーの陰解法も実施する新しい複合材粒子流動シミュレーションの開発が求められており、これが研究課題の核心となる技術的「問い」である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MPS 法を用いて 3D プリント複合材でポイド率の誤差 $\pm 5\%$ の程度の荒いシミュレーションとフィラメント間融合度予測を実施するシステムを作成することである。固体の繊維と流体の樹脂の固液混合流体を複合材粒子として解く場合、繊維の体積含有率や樹脂の凝固率で粒子の挙動は流体粒子とは異なる。そこで、粒子内に固体が多い場合、ナビエ・ストークス方程式から Darcy 則に切り替えて解析を試みることも検討する。この場合、凝固した複合材粒子の壁には非圧縮性が崩れる可能性があるため、隣接部に別のパスを印刷する再溶融時に問題を発生する可能性がある。この場合には仮想的に整列した粒子を配列して対応する。なお、簡便な実験で差異がない場合にはナビエ・ストークス方程式だけを考慮し、固体温度の限界で粒子の運動を停止させる措置をとる。これは実験的に検証して決定する予定である。

3. 研究の方法

複合材粒子を用いる MPS 法の詳細は参考文献 [越塚誠一, 他, 粒子法入門, 2016, 丸善出版] に記載されている。ここでは概略だけ述べる。粒子は、常に固体の繊維と、固体熱可塑性樹脂、液化熱可塑性樹脂からなる複合材とみなす。繊維の体積含有率を V_f 、粒子の体積液相率を η_c 、粒子のエンタルピーを H とすると、エンタルピーと温度、液相率の関係は図 1 のようになっている。

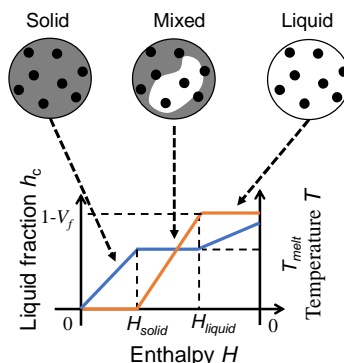


Fig.1 Relationship between liquid fraction, temperature, and enthalpy in a composite particle model with phase change.

解析に用いる物性値は複合則で求められる．これらは全て文献[Yuto Imaeda, et al., Composites Part C, 6, 2021, 100195]に記載のものを用いている．圧力の陰解法による解析だけでなく，熱解析と粘性解析も陰解法を用いることで，ノズル径よりも小さい微小な粒子の解析に対して大きなタイムステップ幅を採用できるようにしている．

実験は QIDI TECH 社の 3D プリンタ，X-Plus を用いて SCFRP 材料である Onyx を G-code にて射出成形した．最初に 1 本のパスを成形する試験を実施し，本解析手法の有効性を検証した．

4. 研究成果

3次元解析のモデルを図2に示す．粒子数は51562個であり，計算に用いたタイムステップは 1.0×10^{-5} [s]である．

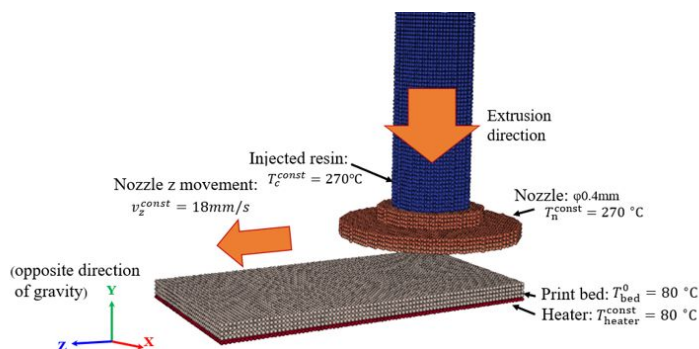


Fig.2 3D model of MPS simulation ($t = 0$ s)

解析結果は3次元座標と時間軸を持つ4次元データである．そこで，今回は解析終了時間に着目し，以下の図3のように断面データを取得する．図3では例としてXY平面， $Z=0.70$ [mm]での取得の様子を示しているが，今回はこのZを変化させた図と，YZ平面， $X=0$ [mm]での位置を取得する．図4に今回取得した断面をXZ平面で図示した．

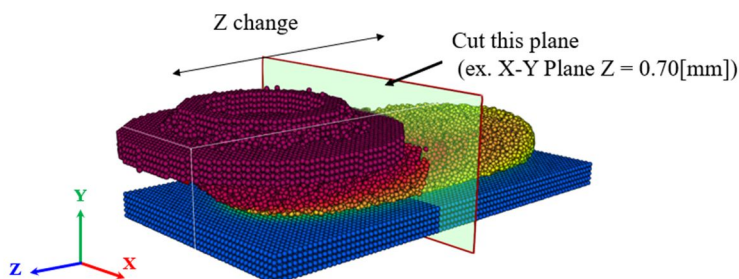


Fig.3. Display method in 3D simulation results

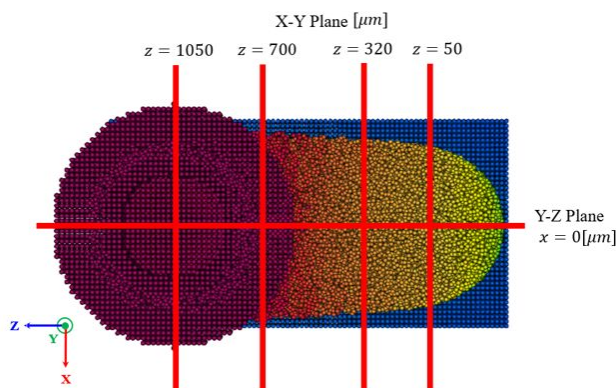
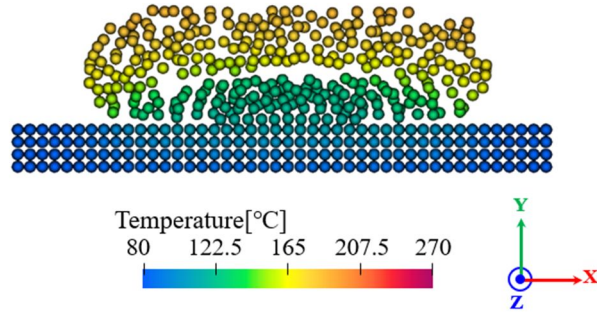
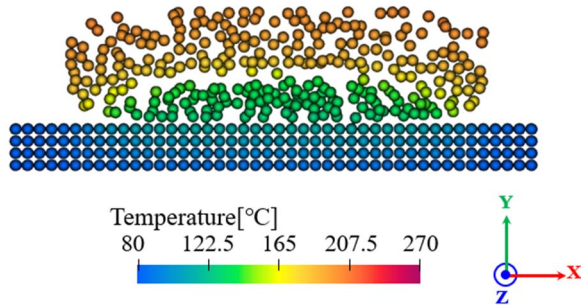


Fig.4 Display position in 3D simulation results

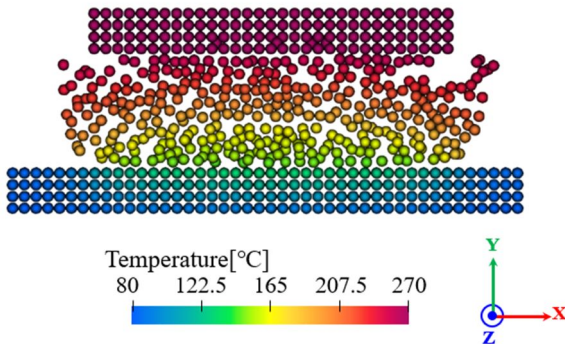
それぞれの位置における温度分布を図5に示す．



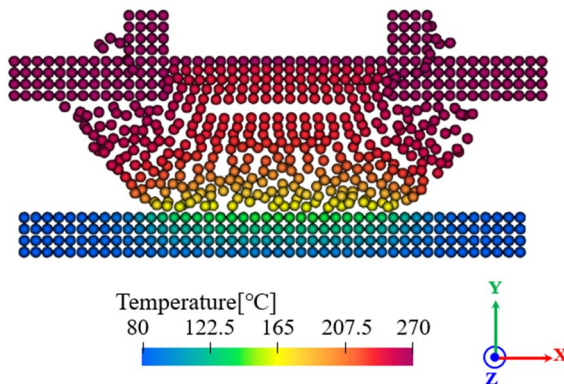
(a) Distribution of temperature during injection at $z = 50\mu\text{m}$.



(b) Distribution of temperature during injection at $z = 320\mu\text{m}$.



(c) Distribution of temperature during injection at $z = 700\mu\text{m}$.



(d) Distribution of temperature during injection at $z = 1050\mu\text{m}$.

Fig.5 Analyzed results of temperature distribution for Onyx obtained by the 3D proposed method based on MPS method.

温度分布から、ノズルから離れるとすぐに樹脂は固体になっていることがわかる。
次に、断面形状を実験と比較する。断面形状の比較は ZNCC (Zero-means Normalized Cross-Correlation) 法で画像の相互相関係数で類似度を表して比較する。結果を図 6 に示す。



Fig.6 Comparison image of analysis result and experimental result

ここで、比較する 3 次元断面はすべての粒子が固体に変化している XY 平面, $z = 50\mu\text{m}$ を取得する。それぞれの画像の背景色を黄色として、フィラメント部を実験結果では赤色、解析結果は緑色として重ね合わせてプロットする。赤色と緑色が重なった場所は黒色となる。

この結果をみると、特にノズル上部の部分についてよく再現できていることが見て取れる。相関係数は 0.948 であり、これは 2 次元の解析値とほとんど変わらない。そのため 2 次元、3 次元のどちらでも現象をよく模擬できていると考えられる。また、2 次元、3 次元の結果がよく一致したことにより、本提案手法にて用いた、3 次元ノズル移動の 2 次元平面での模擬手法は妥当であったといえる。

隣接する 2 つのパスの融合シミュレーション結果を図 7 に示す。本シミュレーション手法によって、当初想定していた融合プロセスのシミュレーションも達成できた。

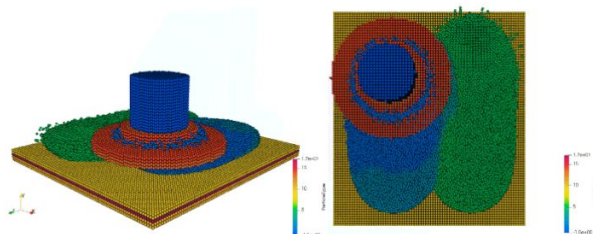


Fig.7 Fusion process simulation between two paths.

図 8 に熱伝導異方性を入れたシミュレーションの結果を示す。以上から、本研究の目的を達成した。

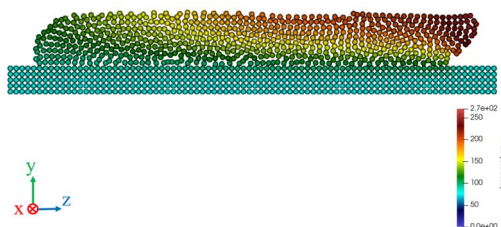


Fig.8 Effect of orthotropic thermal conductivity.

図 8 に異方性を入れた際の温度分布を示す。図 8 では、プリントは 2D 解析し、左からスタートして右に印刷している。右の上部が兵站な部分がノズル位置である。プリント時には炭素繊維の方向が揃って印刷方向に向くことが知られている (古賀洋一郎, 他, 強化プラスチック, 2017, 63)。したがって、図 8 の左右方向に高い熱伝導係数があり、上下方向には樹脂と同等の熱伝導率がある。実際の熱伝導率異方性が測定できないため、仮想的に異方性を作成し、計算した結果が図 8 である。異方性の存在によって、上下方向に熱伝導は行われにくくなり、熱はパス上部を左右方向 (印刷パス方向) に伝わるようになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akira Todoroki, Yuto Imaeda, Ryosuke Matsuzaki, Masato Ueda, Yoshiyasu Hirano	4. 巻 12
2. 論文標題 2D fusion simulation and experimental confirmation of print paths using composite particles with particle method for fused filament fabrication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Open Journal of Composite Materials	6. 最初と最後の頁 111, 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/ojcm.2022.124009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Imaeda Yuto, Todoroki Akira, Matsuzaki Ryosuke, Ueda Masato, Hirano Yoshiyasu	4. 巻 6
2. 論文標題 Modified moving particle semi-implicit method for 3D print process simulations of short carbon fiber/polyamide-6 composites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part C: Open Access	6. 最初と最後の頁 100195 - 100195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcomc.2021.100195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------