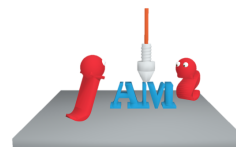


論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	大型化のための3Dプリント部品接合法の提案
Title(English)	Proposal of 3D Printed Parts Joining Method for Larger Size
著者(和文)	金井規聡, 遠藤玄
Authors(English)	Norisato KANAI, Gen ENDO
出典(和文)	Agora of Additive Manufacturing, paper 24005
Citation(English)	Agora of Additive Manufacturing, paper 24005
発行日 / Pub. date	2024, 11



大型化のための3Dプリント部品接合法の提案

金井規聡^a, 遠藤玄^{b*}

^a School of Engineering, Institute of Science Tokyo, Tokyo, Japan

^b School of Engineering, Institute of Science Tokyo, Tokyo, Japan

ABSTRACT

In recent years, it has been expected that conventional parts used in industrial robots can be replaced with 3D printed materials to reduce weight and improve performance. However, it is not easy to produce large parts in one piece using a 3D printer. This is due to the problem of thermal shrinkage and the fact that the size of the part depends on the bed size of the 3D printer. Therefore, it would be highly versatile if small parts could be joined easily and without loss of strength to form large parts. We proposed a new joining method by mating and bonding square pyramidal concavo-convex parts, and evaluated its strength by three-point bending tests. As a result, strength of about 140% was obtained compared to bulk materials of the same size. Comparisons were also made with different shapes and materials to demonstrate the effectiveness of the proposed joining method.

Keywords: 3D Printing, Additive Manufacturing, Potassium Titanate Fiber Reinforced Material, Joining

1. 緒言

近年、3Dプリンタの普及は著しい。3Dプリンタには、樹脂を扱う熱溶解積層方式 (fused filament fabrication, FFF) (fused deposition modeling, FDM), 光造形法 (stereolithography, SLA), 材料噴射法 (material jetting), 結合剤噴射法 (binder jetting) など、様々な方式が存在する[1]。金属材料を使用する技術としては、レーザー溶融法 (selective laser melting, SLM), レーザー焼結法 (selective laser sintering, SLS), 電子ビーム溶融法 (electron beam melting, EBM) などが挙げられる[2][3]。これらの中で、FFFは熱可塑性フィラメント材料を加熱・溶融し、押し出して造形を行う方式である。材料の調達が容易で、コストパフォーマンスにも優れていることから、現在最も広く利用されている方式である。3Dプリント技術は、従来の加工機械では難しかった複雑な形状を、削り出すことなく容易に生成できるという特徴を持つ。さらに、所定の位置に固定できる材料であれば、使用する材料の量に制限がないという利点もある。このため、個人や家庭での利用にとどまらず、食品産業、自動車産業、航空宇宙産業など、幅広い分野で応用が進んでいる[4]。特に、産業用ロボットの金属部品を3Dプリント材料で代替し、軽量化や高性能化を図ることが期待されている。

しかし、ロボットアームなどの大型部品を3Dプリンタで一体造形することは容易ではない。その理由の一つとして、3Dプリンタの作業領域に空間的な制約があることが挙げられる。作業領域を拡大するには大型の3Dプリンタを使用する方法が一般的であり、6自由度のケーブル機構を用いた材料押出式3Dプリンタ[5]や、移動可能なロボットアームを使用した材料吐出式3Dプリンタシステム[6]などが提案されている。しかしこれらの装置は複雑な機構を持ち、広い設置スペースが必要であるため、利用できるユーザーは限られる。また、ベルトコンベア式の3Dプリンタ[7]も市販されているが、造形の方向が制限されることや、造形高さが十分に確保できないなどの課題があり、汎用性に欠ける現状がある。

* Corresponding author

Email: endo.g.aa@m.titech.ac.jp

Received 19 June 2024; Revised 2 October 2024; Accepted 21 October 2024

Available online 1 November 2024

さらに、大型化に伴い精度が低下するという問題もある。一般的な 3D プリンタはフィードフォワード制御を採用しており、押出部の位置や押出された樹脂のモニタリングが行われていない[8]。そのため、ある層で発生した欠陥が次の層に影響を与え、接着や固定が不良になる可能性が高く、最終的な製品の品質にも大きく影響を及ぼす。また、熱収縮による反りやそれに伴う寸法のずれも、造形物が大きくなるにつれて無視できない問題となる。

これらの理由から、小型部品を簡単に接合し、強度を維持したまま大型部品を構成できれば、ロボット分野に限らず、幅広い応用が可能となる。金属や熱可塑性樹脂の接合技術として、近年注目を集めている方法に摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) がある。FSW は、直径 10~20 mm 程度の棒状工具 (ツール) を高速回転させながら材料と接触させ、発生する摩擦熱を利用して接合を行う技術である[9][10]。FSW の利点として、添加剤を必要とせず母材同士を直接接合するため、腐食や欠陥の発生を抑制できることが挙げられる。また、異種材料の接合も可能である。しかし FSW にはいくつかの課題も存在する。まず、専用の機械設備が必要であり、初期導入コストが高いことが指摘されている。また、同一材料であっても、段取り方法や接合条件 (工具の回転速度、送り速度、ツールの押し込み量など) により接合品質が大きく左右される。このため、最適な接合条件を設定するためには試行錯誤や経験に基づくノウハウが必要であり、その習得には時間と費用がかかる。先行研究では、厚さ 5 mm の PLA シートを対象に FSW を用いた接合が行われ、工具の回転速度および送り速度の異なる組み合わせで引張試験が実施された[11]。しかしながら、高い接合強度が得られる条件の範囲は限定されており、最大でも接合効率は 40%程度に留まることが確認されている。

本研究の目的は、高強度かつ高い汎用性を有する新たな接合法を提案し、3 点曲げ試験による強度評価を通じてその有効性を示すことである。本研究で対象とするのは、ロボットアームなどに使用される長手方向に長い部品であり、荷重は曲げを想定している。

2. 提案する接合方法

今回提案するのは、四角錐形状凹凸部品の嵌合・接着による接合である[12]。Fig. 1 をオス部、Fig. 2 をメス部と呼ぶ。寸法は幅 20 mm、高さ 20 mm、オス部端から突起部根本までが 16 mm、突起部根本は 18 mm × 18 mm で、突起部長さは 48 mm、頂角が 8.0°である。オス部は 2 分割して X-Y 方向で造形した後、接着剤で接着し、接合界面が造形テーブルと直交するように、メス部と嵌合・接着した。メス部は長さ 64 mm であり、Z-X 方向で造形する。オス部とメス部の接合後の寸法は 20 mm × 20 mm × 80 mm となる (Fig. 3)。

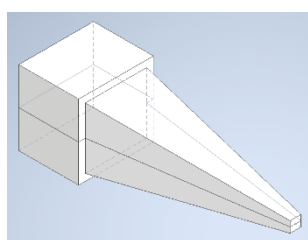


Fig. 1 Convex part

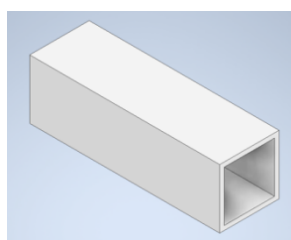


Fig. 2 Concave part



Fig. 3 After joining

この形状に至った理由は以下である。

- ・接合界面が曲げ荷重方向に対して可能な限り垂直である

曲げに対して最も弱い亀裂の方向は、荷重に対して平行な方向である (Fig. 4)。よって、部材を長手方向にそのまま縦に接合するのは最も弱い。仮に亀裂方向が曲げ荷重に対して垂直であれば、亀裂が進展する力は直接受けないため、強度を保つことができると考えられる (Fig. 5)。よって、3D プリントの積層界面が力の方向と垂直となるように接合するのが理想だが、それは長手方向に長くしたいという目的と矛盾する。よって、その間をとって斜めに接合するのが最適だと考えた。

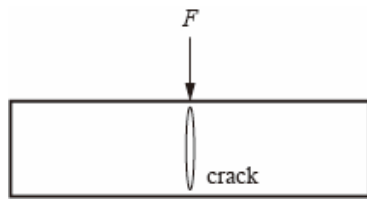


Fig. 4 Parallel cracks

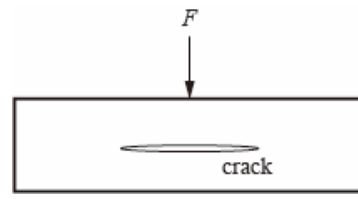


Fig. 5 Vertical cracks

- ・接着剤が回りやすい

接着剤をメス部の底に溜めておき、オス部を押し込むことで、容易に均一に接着剤を回すことができる。

- ・上下左右対称である

様々な方向からの荷重が想定されるため、形状が方向に依らないことが望ましい。

- ・長軸周りのモーメントに強い

円錐形での嵌合でも上記 3 つの条件を満たすが、円錐形にすると、長軸周りのモーメント (ねじり) に対する抵抗が小さくなると考えられる。角錐であればその抵抗を大きくできる。

先行研究として、伝統的な木材継手の用法を 3D プリント材に応用した接合法が提案されている[13]。しかし、曲げ荷重の方向によって強度に大きな差が生じ、最大でも材料公称値の 25%程度で破断することが確認されている。このように、木材の継手仕口をそのまま 3D プリント材に応用しようとすると、加工精度が大きな課題となる。木材の場合、いわゆる「職人技」によって高い密着性と強度が実現されるが、3D プリント材では材料の収縮やプリント精度の限界により、微細な歪みや凹凸が発生し、継手が緩くなったり十分に機能しないことが懸念される。そのため本論文で提案する接合法は、従来の木材継手から着想を得つつも、接着を前提とした手法であり、蓄積されたノウハウや高い初期導入コストを必要とせず、3D プリント技術の特性を活かす点において、従来の接合法とは異なる新たな接合法であると考えている。

3. 試験条件

今回使用した材料は、チタン酸カリウム繊維強化ナイロン樹脂 (POTICON NTL34M, 大塚化学) である。NTL34M は、バイオベースの PA 樹脂 (ナイロン樹脂) にチタン酸カリウム繊維が 20w%配合されている。耐衝撃性や耐摩耗性に優れており、実際にトコロイド減速機[14]や四足歩行ロボット[15]等の適用例がある。POTICON フィラメント (以降 POTICON と略す) の 2023 年 12 月時点での物性[16]を Table 1 に示す。3D プリントは G-ZERO (グーテンベルク社製)、スライサソフトは PrusaSlicer (PRUSA RESEARCH 社製) を用い、造形条件は Table 2 の通りである。

Table 1 Physical properties of POTICON

Physical properties	Value
Tensile strength [MPa]	100
Tensile modulus [GPa]	5.9
Bending strength [MPa]	167
Elasticity modulus [GPa]	6.3
Specific density [g/cm ³]	1.27
Glass transition temperature [°C]	60

Table 2 Laminating parameters

Parameters	Name / Value
Nozzle diameter [mm]	0.4
Extrusion width [mm]	0.42
Nozzle temperature [°C]	260
Pitch [mm]	0.1
Number of shells	3
Infill [%] / Shape	100 / Linear

造形方向は、長手方向を寝かせて造形したものを X-Y 方向 (Fig. 6)、長手方向を立てて造形したものを Z-X 方向 (Fig. 7) と呼ぶ。Fig. 6, 7 の矢印は積層方向を示している。

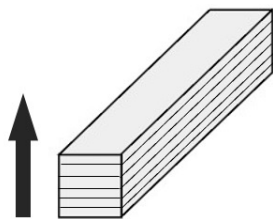


Fig. 6 Build direction (X-Y)

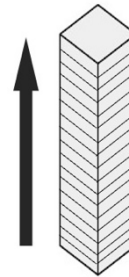


Fig. 7 Build direction (Z-X)

3D プリンタで造形された物体は積層された層の集合体であり、各層は積層材料同士の溶着によって結合されている。積層面は、積層材料同士の結合力が弱く、積層面と平行方向の荷重に対して低強度である。そのため一般に、積層方向に対して垂直に曲げられる場合 (Fig.6) の方が、積層方向に沿って曲げられる場合 (Fig.7) よりも強くなる。それに加え、短繊維がノズルを通過する際に、X-Y 方向に配向して強度が上がるため、X-Y で造形した場合の方が Z-X よりも曲げに強い。Z-X で造形した試験片に曲げを加えた場合、積層界面で剥離を起こし、破断する。

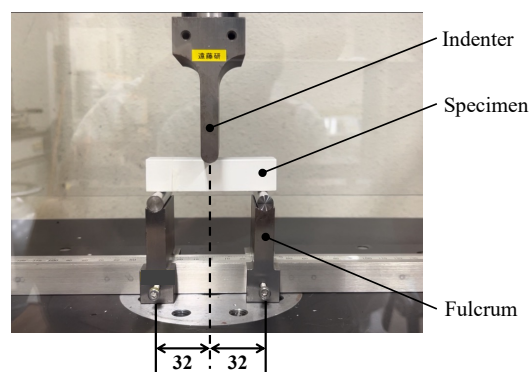


Fig. 8 Three-point bending test

試験方法は、オートグラフ (島津製作所製: AGX-20kNVD) を用いた 3 点曲げ試験である。ISO 178:2010 を参考にし、支点間距離を 64 mm、試験速度 2 mm、圧子の半径 5 mm と設定した。試験片の中央に圧子が来るよう調整し、試験片が割れるまでのひずみと曲げ応力を測定した。試験の様子を Fig. 8 に示す。条件ごとに試験片を 3 本作成し、曲げ強さと曲げ弾性率の平均値を算出した。

4. 試験結果

4.1 形状を変化させた際の比較

提案した接合法の有効性を示すため、以下の(a)~(d)の接合形状で比較を行った。なお、以下に示す(c), (d)の接合方法は、第2節で示したものと同様 (オス部は2分割して X-Y で造形した後、接着剤で接着し、接合界面が造形テーブルと直交するように、メス部と嵌合・接着) である。接着剤には二液混合型エポキシ系接着剤 (セメダイン社製 EP001N) を用いた。

(a) 提案する接合法 (第2節参照)

(b) ねじによる締結

長手方向に部材を伸張させる場合、最も一般的な方法はねじによる締結である。Fig. 9~11 に示すように、直径 18 mm および 10 mm の 2 種類のねじ部品をピッチ 2.5 mm で造形し、接着剤を使用せずにねじ込みによって接合を行った。造形方向は、おねじ・めねじともに Z-X 方向とした。これは、ねじのような部品の造形が X-Y 方向では困難であるためである。特に本研究で使用した材料においては、サポート材による表面精度の低下が顕著であり、ねじ込み操作に支障をきたすことが確認された。このため現実的な接合方法として、ねじ部品は Z-X 方向で造形することが最適であると判断し、この方向で造形した試験片の評価を行った。

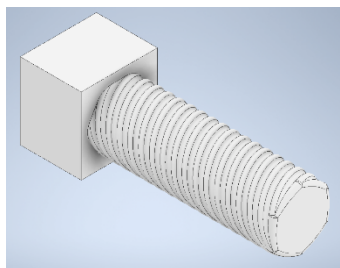
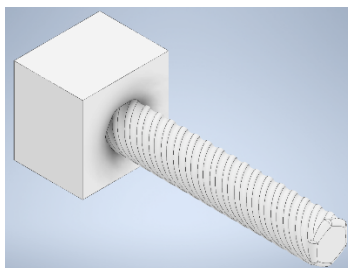
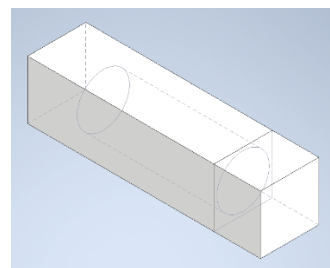
Fig. 9 Joining with screws ($\phi 18$)Fig. 10 Joining with screws ($\phi 10$)

Fig. 11 After joining (Screw)

(c) 円錐による接合

Fig.12~14 のような突起部根元が $\phi 18$, 突起部長さが 48 mm の円錐形状部品の嵌合・接着による接合法である。

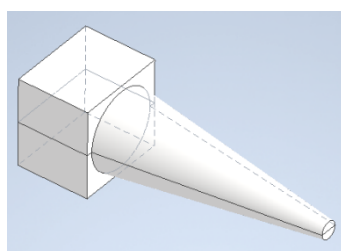


Fig. 12 Convex part (Cone)

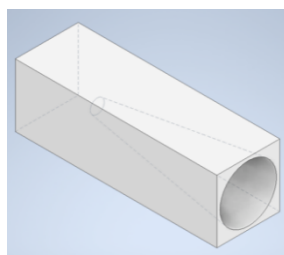


Fig. 13 Concave part (Cone)

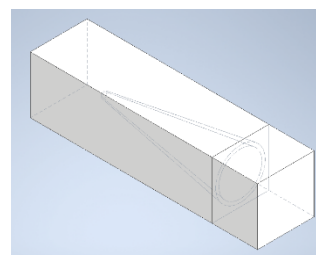
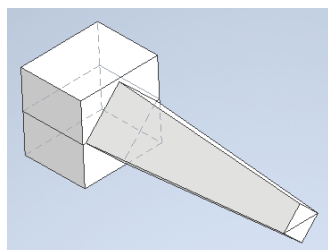
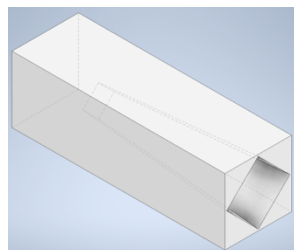
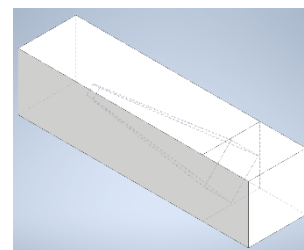


Fig. 14 After joining (Cone)

(d) 四角錐による接合

Fig. 15~17 に示すような、根元がひし形凹凸部品の嵌合・接着による接合法である。突起部根元のひし形対角線の長さは18 mm $\times$ 18 mm, 突起部長さは 48 mm である。

Fig. 15 Convex part
(Pyramid)Fig. 16 Concave part
(Pyramid)Fig. 17 After joining
(Pyramid)

比較対象として形状(b), (c), (d)を選択した理由について述べる。まず形状(b)のねじ接合は、部品を長手方向に接合する際に最も一般的であり、容易に想定される接合法であることから、本研究において提案する接合法との比較を通じて、その優位性を示すことが重要であると考え選定した。形状(c)については、第2節で述べたように、提案した接合法 (形状(a)) と比較して長軸まわりのモーメントに対する強度が低いと予測されるため、積極的に選択する理由は少ない。しかし、部品のサイズや製作精度の影響によっては、円錐形の嵌合が適用される場合もあると考えられるため、その強度を評価する意義があると判断した。形状(d)は、形状(a)の突起部を長軸まわりに45°回転させたもので、接合部 (オス部根元) の水平断面積が大きくなるため、曲げ強度の低下が予想される。しかし、その結果を示すことで形状(a)の優位性を強調できると考え、形状(d)も比較対象に選定した。

(a)~(d)の、3点曲げ試験の結果を Fig. 18~21 に示す。図中の Bulk Z-X は、充填率 100%で Z-X に造形した 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 80 mm試験片であり、Bulk X-Y は同条件で X-Y に造形したものである。以後、それぞれ

基準試験片(X-Y), 基準試験片(Z-X)と呼ぶ. なお, 本論文で使用する「バルク材」とは, 充填率 100%で一体造形した試験片のことを指すものとする.

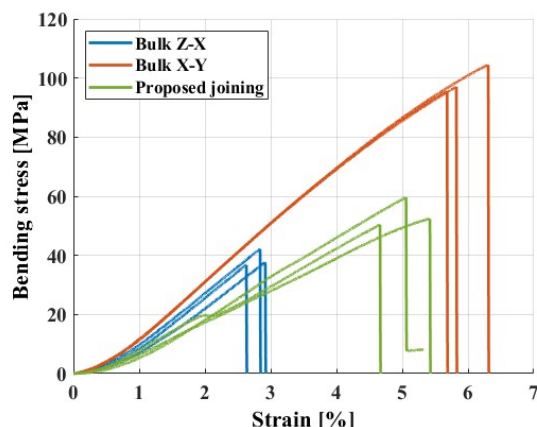


Fig. 18 Results of three-point bending test ((a) Proposed joining)

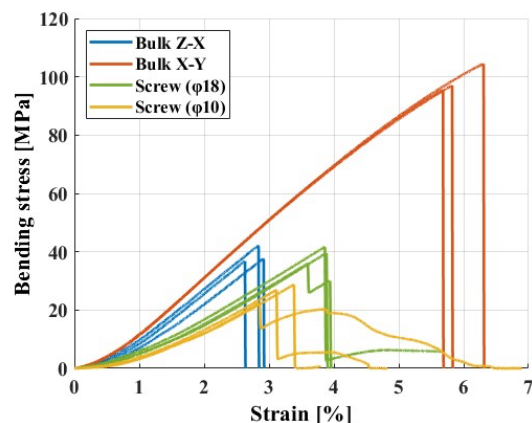


Fig. 19 Results of three-point bending test ((b) Screw)

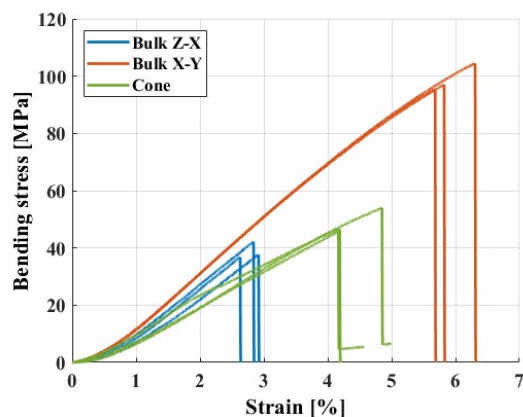


Fig. 20 Results of three-point bending test ((c) Cone)

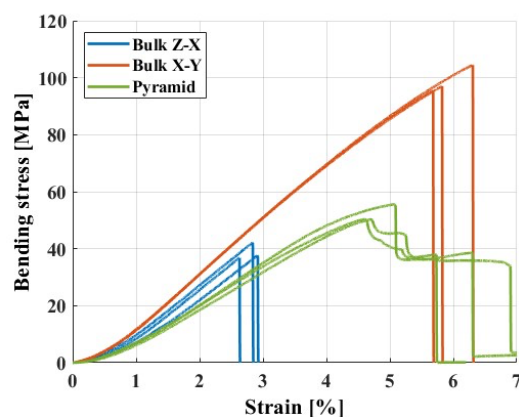


Fig. 21 Results of three-point bending test ((d) Pyramid)

曲げ強さおよび曲げ弾性率の結果を Table 3 に示す. 曲げ弾性率 E [GPa] は, 応力-ひずみ線図における弾性変形領域の傾きとして定義される. 各試験の応力-ひずみ線図において, 最大応力を 100%としたときの 15% から 65%の範囲を抽出し, その傾きをもとに算出を行った. なお, 曲げ応力が 65%付近で一度停止し, 試験片を観察した結果, 塑性変形は認められなかった. また, 同じ試験片に対して 65%までの負荷と除荷を 3 回繰り返したところ, いずれの試行でも同一の応力-ひずみ線図が得られた. これらの結果から, 今回の試験で用いた曲げ弾性率の算出範囲は弾性領域に該当することが確認された.

Table 3 Summary of results (Comparison of shapes)

Shape	Bending strength [MPa]	Bending modulus [GPa]
Standard specimen (Z-X)	38.9	1.60
Standard specimen (X-Y)	99.0	1.95
(a) Proposed joining	54.1	1.19
(b) Screw ($\phi 18$)	39.1	1.14
(b) Screw ($\phi 10$)	26.0	0.973
(c) Cone	48.7	1.27
(d) Pyramid	52.0	1.35

曲げ試験後の試験片を Fig. 22 に示す.

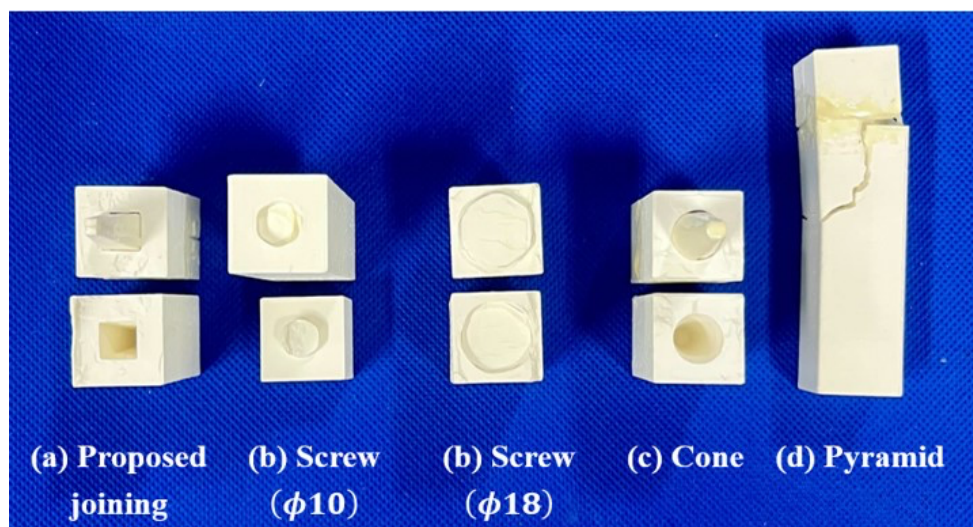


Fig. 22 Specimen after three-point bending test

これらの結果から、以下のことが言える.

- ・まず(b) Screw では、おねじもろとも破断が確認された. これは、おねじおよびめねじがともに Z-X 方向で造形されており、曲げに対する強度が両者で同等であったためと考えられる. 次に、(d) Pyramid では、メス接合部の最も厚さが薄い部分に亀裂が生じ、一部破断した. これは、該当部分で応力集中が発生したことが原因であると推察される. さらに、(a) Proposed joining および(c) Cone においては、メス部のみが破損し、オス部は残存したままであった. この点については後述する.
- ・ねじによる締結において、 $\phi 18$ の方が曲げ強度が高いことが確認された. これは、 $\phi 10$ のねじでは曲げ方向と平行な接合界面の面積が大きく、おねじの根元付近で応力集中が生じたためであると考えられる. また、おねじの直径を最大化することで、基準試験片(Z-X)と比較して曲げ弾性率は約 29%低下するものの、曲げ強度に関してはほぼ同等の結果が得られることが確認された.

・提案した接合法を用いることで、基準試験片(Z-X)に対しては 139%、基準試験片(X-Y)に対しては 54.6%の曲げ強度が得られることが確認された. なお、曲げ弾性率は、基準試験片(Z-X)に対して 74.4%、基準試験片(X-Y)に対して 61.0%であった.

・ロボットアームなどの長手方向に長い部品を構成する際、締結や嵌合・接着によって接合を行うと、同寸法のバルク材と比較して曲げ弾性率の低下は避けられない. しかし、曲げ強度に関しては、バルク材を Z-X 方向に積層した場合と同等以上の結果が得られることが確認された.

・形状(c), (d)と比べ、形状(a)の曲げ強さが大きかった理由を考察する.

例として、中央を任意形状にくり抜かれた幅と高さが a の四角柱 (部品 A) に、部品 B をぴったりはめ合うように挿入することを考える. 部品 A のヤング率を E_A 、部品 B のヤング率を E_B とし、 $E_A < E_B$ とする. この複合部材の断面二次モーメントは、部品 A と部品 B それぞれの断面二次モーメントに、それぞれのヤング率を考慮して補正を加えた形で求める. この断面二次モーメント I は次の式で与えられる.

$$I = I_A + I'_B \quad (1)$$

ここで、 I_A は部品 A の断面二次モーメント、 I'_B は部品 B の等価断面二次モーメントである. I'_B は、ヤング率比 $n = E_B/E_A$ を用いて次のように変換される.

$$I'_B = n \cdot I_B \quad (2)$$

また、部品 A にかかる曲げ応力、部品 B にかかる曲げ応力をそれぞれ σ_A, σ_B とすると、

$$\sigma_A = \frac{My_A}{I} \quad (3)$$

$$\sigma_B = \frac{My_B}{I} \cdot \frac{E_A}{E_B} \quad (4)$$

となる。\$M\$は曲げモーメント、\$y_A, y_B\$はそれぞれの部品の中立軸からの距離である。(3),(4)より、中立軸からの距離に依らず明らかに\$\sigma_A > \sigma_B\$であるため、くり抜かれる幅や高さ(部品Bの幅、高さ)に依らず、部品Aが先に割れて部品Bは割れずに残る。仮にくり抜く幅と高さを\$x\$の四角形とすると、断面二次モーメント\$I_{quad}\$は

$$I_{quad} = \left(\frac{a^4}{12} - \frac{x^4}{12} \right) + \frac{E_B}{E_A} \cdot \frac{x^4}{12} = \left(1 - \frac{E_B}{E_A} \right) \frac{x^4}{12} + \frac{a^4}{12} \quad (5)$$

から求められる。また、くり抜く形状を直径\$x\$の円、対角線の長さが\$x\$のひし形とすると、それぞれの断面二次モーメント\$I_{circle}, I_{rhombus}\$は

$$I_{circle} = \left(\frac{a^4}{12} - \frac{x^4}{64} \right) + \frac{E_B}{E_A} \cdot \frac{x^4}{64} = \left(1 - \frac{E_B}{E_A} \right) \frac{x^4}{64} + \frac{a^4}{12} \quad (6)$$

$$I_{rhombus} = \left(\frac{a^4}{12} - \frac{x^4}{48} \right) + \frac{E_B}{E_A} \cdot \frac{x^4}{48} = \left(1 - \frac{E_B}{E_A} \right) \frac{x^4}{48} + \frac{a^4}{12} \quad (7)$$

となる。\$E_A, E_B, a\$は定数であるため、(5)~(7)より\$I\$は\$x\$に依存し、\$x\$が\$a\$に近づくほど大きくなる。すなわち曲げ強さも大きくなることがわかる。よって、挿入する部品Bの断面二次モーメントを最も大きく取れる形状が最適であると言える。この考え方を今回の接合法に応用すれば、部材Aはメス部、部材Bはオス部であり、断面二次モーメントを最大にできる形状(a)が最適だと考えられる。よって、部品全体の曲げ強さを最も大きくするには、荷重点断面でのオス部の断面二次モーメントが最も大きくなるように設計を行えばよい。

さて、本研究で用いた形状(a), (c), (d)の、曲げ荷重点での断面を考える。形状(a)は、オス部の一辺\$x_{quad} = 11.25\$ [mm]で、\$x_{quad}^4/12 = 1335\$ [mm\$^4\$]であった。形状(c)は、オス部直径\$x_{circle} = 11.25\$ [mm]で\$x_{circle}^4/64 = 250.3\$ [mm\$^4\$]、形状(d)は、オス部ひし形対角線\$x_{rhombus} = 13.25\$ [mm]で\$x_{rhombus}^4/48 = 642.1\$ [mm\$^4\$]であった。すなわち\$x_{circle}^4/64 < x_{rhombus}^4/48 < x_{quad}^4/12\$であり、(5)~(7)より明らかに形状(a)の断面二次モーメントが大きくなる。このような理由から、形状(a)の曲げ強さが最も大きくなったと考えられる。

4.2 材料を変化させた際の比較

4.1節の実験では、材料にPOTICONを使用していた。最も高い曲げ強さを得られた4.1節(a)による接合が、他の材料でも有効か検証するため、ABS系材料であるZ-ULTLAT(zortrax社製)[17], Onyx(Markforged社製)[18]でも試験を行った。試験片の寸法や造形方向は第2節で記載したものと同様であるが、Z-ULTRATには、塩化ビニル樹脂を主成分とした溶剤形接着剤(セメダイン社製CA-243)を用いている。

それぞれの材料の物性値をTable4に、試験結果をFig. 23, 24, Table 6に示す。

Table 4 Physical properties of Z-ULTLAT and Onyx

Physical properties	Z-ULTRAT	Onyx
Tensile strength [MPa]	32.0	37
Tensile modulus [GPa]	-	2.4
Bending strength [MPa]	54.00	71
Bending modulus [GPa]	1.85	3.0
Specific density [g/cm\$^3\$]	1.179	1.2
Glass transition temperature [°C]	106.40	-

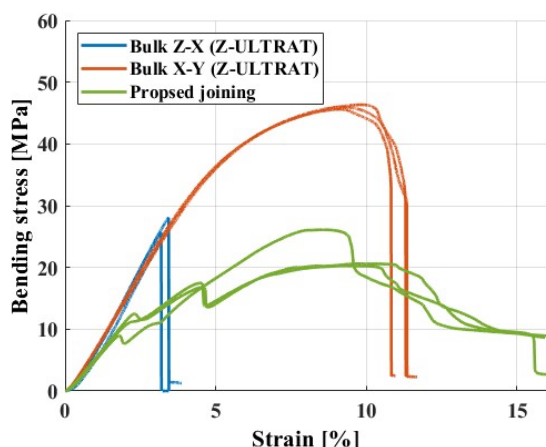


Fig. 23 Results of
three-point bending test (Z-ULTRAT)

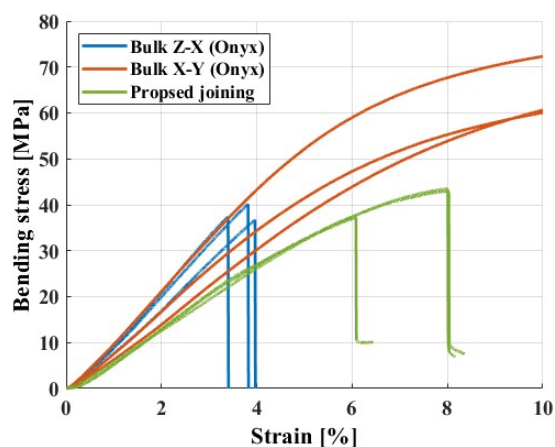


Fig. 24 Results of
three-point bending test (Onyx)

Table 6 Summary of results (Comparison of materials)

Material	Shape	Bending strength [MPa]
Z-ULTRAT	Standard specimen (Z-X)	26.7
	Standard specimen (X-Y)	46.0
	Proposed joining	22.3
Onyx	Standard specimen (Z-X)	38.1
	Standard specimen (X-Y)	73.5
	Proposed joining	41.2
POTICON	Standard specimen (Z-X)	38.9
	Standard specimen (X-Y)	99.0
	Proposed joining	54.1

結果として、Onyx は POTICON とおおよそ同様の傾向が見られたが、Z-ULTRAT では基準試験片(Z-X)より低い曲げ強さであった。この理由として、Z-ULTRAT のみ異なる接着剤を用いたことや、他の材料に比べ延性材料に近い材料であることが考えられるが、材料による傾向を明確にするにはより多くの材料で試験を行う必要がある。

4.3 低充填率かつより大きな造形物の接合

これまでの試験では、試験片の充填率を 100%にして造形したが、コストや質量の面から、実際には充填率を落として造形することが多い。また、ロボットアーム等に適用することを考えた場合、試験片のサイズを大きくした方が実用に近い。よって、より実用的な条件に近づけた以下の 2 つで比較を行う。

A. 20 mm × 20 mm × 160 mm 試験片 (Fig. 25)

これは基準試験片の長さを 2 倍にしたものである。造形方向は X-Y で、充填率は 37% (充填形状：三角形) に設定した。

B. 提案した接合法 (Fig. 26)

オス、メスの根本部を第 2 節のものから 40 mm ずつ伸ばし、嵌合・接着させることにより、A と同じ寸法にする。第 2 節と同様に、オス部は 2 分割にして X-Y で造形して接着し、メス部は Z-X で造形している。Prusa Slicer は、一つの部品内で充填率を変化させることが可能である (Fig. 27, 28)。接合部 (中央の 20 mm × 20 mm × 80 mm) のみ充填率 100%に設定し、その他の部分は 37% (充填形状：三角形) で造形を行った。

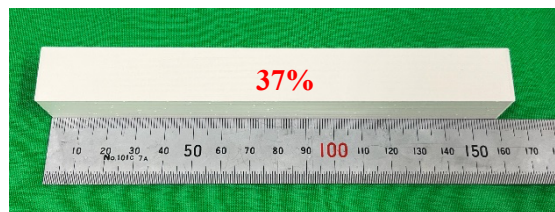


Fig. 25 20 mm × 20 mm × 160 mm specimen

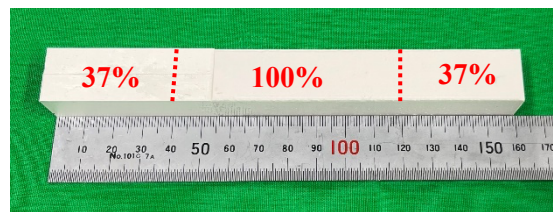
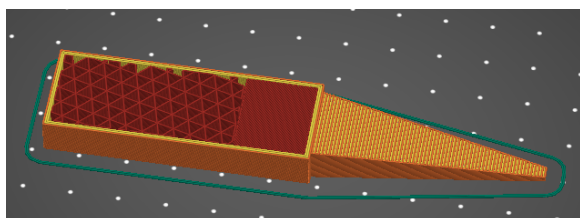
Fig. 26 Proposed joining
(infill 100% at joints only)

Fig. 27 Inner structure (Convex part)

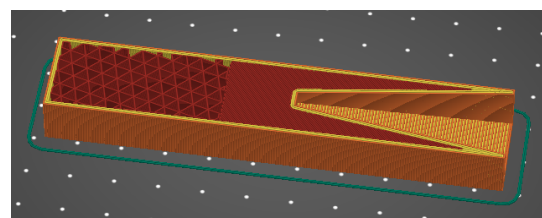


Fig. 28 Inner structure (Concave part)

3点曲げ試験の試験結果を Fig. 29, Table 7 に示す.

結果として、提案した接合法を用いることにより、X-Y で造形した基準試験片に対して曲げ強さ 113%、比強度 77.8%と十分な強度が得られた。また、曲げ弾性率も同程度の値を示すことが確認できた。仮に接合部も充填率 37%で造形した場合、第 2 節で示されたように、曲げ強さは基準試験片に対して約 55%に低下することが予想される。しかし、接合部の充填率を高めることで、全体の質量は増加したものの、それに伴い曲げ強さも向上したと考えられる。その結果として、曲げ強さの向上が質量増加の影響を上回り、比強度の向上にも寄与したものと推察される。

この結果から、試験片の寸法や、荷重のかかり方に合わせて適切に充填率を設定することにより、軽さと強度を両立する接合が可能であると言える。

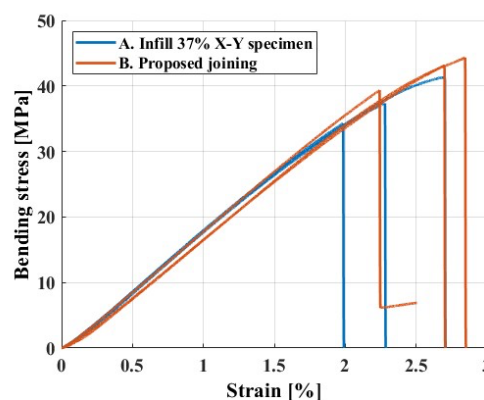


Fig. 29 Results of three-point bending test

Table 7 Summary of results (practical conditions)

	Mass [kg]	Bending strength [MPa]	Specific strength [kN · m/kg]
A. Specimen	0.0422	36.7	27.8
B. Proposed joining	0.0625	42.3	21.7

5. 結言

本研究では、3D プリント樹脂部材の大型化を目的とし、角錐形状の部品を用いた嵌合・接着による新たな接合法を提案した。まず、ねじによる締結、円錐型、四角錐型などの異なる接合形状について、3点曲げ試験を用いた曲げ強さの比較を行った。その結果、提案した接合法が最も高い強度を示し、Z-X 方向で造形した基準試験片と比較して、139%の曲げ強さを達成したことが確認された。次にこの接合法において、POTICON 以外の材料を使用して 3 点曲げ試験を実施した。POTICON と類似した挙動を示す材料もあったが、より詳細な解析を行うためには、より多くの材料での試験が必要であるとの結論に至った。最後に、試験片の寸法を拡大し、充填率を下げた、より実用に近い条件で比較を行った。適切な充填率の設定により、軽量化と強度を両立した接合が実現可能であることが確認された。今後は、提案した接合法を用いて多関節ロボットを製作し、その有効性を実証する予定である。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP20016) の一環として行われたものである。また、本論文は、技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構との共同研究の成果であり、技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構が共有著作権を有している。

貴重なコメントをいただきました武居直行教授 (東京都立大学), 太田祐介教授 (千葉工業大学), 高木健教授 (広島大学) に感謝いたします。

参考文献

- [1] Shahrubudin, N., Lee, T. C. and Ramlan, R. J. P. M., An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications, *Procedia Manufacturing.*, 2019, vol. 35, pp. 1286–1296.
- [2] Flaviana Calignano, Diego Manfredi, Elisa Paola Ambrosio, Sara Biamino, Mariangela Lombardi, Eleonora Atzeni, Alessandro Salmi, Paolo Minetola, Luca Iuliano, and Paolo Fino. Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 2017, Vol. 105, No. 4, pp. 593–612.
- [3] N. Shahrubudin, T.C. Lee, and R. Ramlan. An overview on 3d printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 35, pp. 1286–1296.
- [4] Jinsung AHN, Kenichi MURAKAMI, Masahiro HIRANO, Yuji YAMAKAWA, Dynamic compensation system development for advanced 3D printing and its evaluation, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, 2023, Vol.89, No.928.
- [5] Barnett, E., Gosselin, C., Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot, *Additive Manufacturing*, 2015, vol.7, pp. 27-44.
- [6] Zhang, X., Li, M., Limn, J.H., Weng, Y., Tay, Y.W.D., Pham, Q.C., Large-scale 3D printing by a team of mobile robots, *Automation in Construction*, 2018, Vol.95, 98-106.
- [7] CREALITY, CR-30 FDM 3D プリンター, [https:// www.crealty-3d.jp/shopdetail/000000000009/](https://www.crealty-3d.jp/shopdetail/000000000009/), Accessed: May 13, 2024.
- [8] Bisheh, M. N., Chang, S. I. and Lei, S., A layer-by-layer quality monitoring framework for 3D printing, *Computers & Industrial Engineering*, 2021. vol. 157, pp.107314.
- [9] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- [10] 摩擦攪拌接合—FSW のすべて—, 溶接学会編, 産報出版, 2006.
- [11] Senthil.S.M., M.Bhucanesh Kumar, Effect of Tool Rotational Speed and Traverse Speed on Friction Stir Welding of 3D-Printed Polylactic Acid Material, *Applied Science and Engineering Progress*, 2021.
- [12] 金井規聡, 遠藤玄. 積層造形樹脂部品嵌合接合体. 2023-219155.
- [13] Yuta TSUKAMOTO et al., Application of Joint Processing in Wood to 3D Printed Parts, *ROBOMECH*, 1A2-I21, 2023.
- [14] Gen Endo, Akifumi Okubo, and Hiroyuki Nabae, Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot -Part5: Durability Test of a Plastic Trochoidal Gear Reducer-, *ROBOMECH2023*, 1A2-I20, 2023.
- [15] K. S. Shuhei Tsunoda, Hiroyuki Nabae and Gen Endo, Development of Quadruped Robot TITAN-E1 Using Plastic Structural Parts Printed by Fused Deposition Modeling, *ROBOMECH2022*, 2A1-Q07, 2022.
- [16] Ltd. Otsuka Chemical Co., POTICON TISMO Reinforced Compound., [https://www.otsukac.co.jp/ products/chemical/poticon/](https://www.otsukac.co.jp/products/chemical/poticon/), Accessed: November 28, 2023.
- [17] TECHNICAL DATA SHEET, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpgclclefindmkaj/https://cf.zortrax.com/wp-content/uploads/2018/06/Z-ULTRAT_Technical_Data_Sheet_eng-1.pdf, Accessed: April 8, 2024.
- [18] Markforged MATERIAL DATASHEET, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpgclclefindmkaj/<https://web-objects.markforged.com/craft/materials/CompositesV5.2.pdf>, Accessed: April 8, 2024.