

3D プリンターによる造形物を教育利用するための 強度に関する検討 その2

岡村 吉永

A Study on the Strength of 3D Printed Objects for Educational Use Part 2

OKAMURA Yoshihisa

(Received September 30, 2025)

キーワード：3D プリンター、熱溶解積層（FDM）方式、造形物の強度試験装置、技術科教育、ブラケット

はじめに

普及型の3Dプリンターに用いられる熱溶解積層（Fused Deposition Modeling、以下FDM）方式は、樹脂を積層しながら造形物を作成するために層間の剥がれが起きやすいことは良く知られている。これに加え、造形時間の短縮や材料の消費を少なくすることをねらいとして造形物内部を目の粗い構造で充填するため、積層方向や壁の厚さ、内部充填率によっても強度が著しく異なってしまう。こうした3Dプリンターによる造形物の強度に関する詳しい研究としては、造形物の強度評価と充填構造の設計に関する研究（高橋・児玉、2020）や造形物の破断荷重の予測（伊藤・佐藤・増田、2022）、インクジェット3Dプリンターの造形精度と強度に関する報告（安部、2017）などがみられるが、材料力学や材料試験等に関わる専門的知験を有さない者にとっては難解で利用が難しい。学校教育などの使用にあたっては「おおよそ、どのような設計や使い方が良いのか」といった、感覚的に理解しやすい指針が求められる。

こうした情報技術を用いた加工に関して学校教育に目を転じると、「中学校では、技術・家庭科を二つの教科に分離した上で、現行の技術分野において情報技術をより深く、広く学ぶこととしつつ、情報（D）領域のみならず、A～C領域でも情報技術との関連を強化し、全体として『ものづくり』と実生活・実社会を繋げる探究的な学びを充実させてはどうか。」（文部科学省、2025）として、「情報」領域だけでなく「材料と加工」など他の領域においても情報技術を積極的に扱うことが提案されている。情報技術あるいはこれを用いた加工いわゆるデジタル加工を教育に取り入れることは、中学校の技術科を要として教育全体で取り組むことが必須の流れになりつつある。このような状況を踏まえ、本研究では、前報（岡村、2024）において、3Dプリンターで造形物をデザインしたり設計したりする際、どの様にすれば必要な強度が得られるのかを知る準備として、3Dプリンターによる造形物の強度を測る装置を試作した。

本報では、前報を踏まえ、特に課題となった試験装置の信頼性を高めることを主眼に装置の改良を行いその効果を確認した。またこの確認の際、技術科の「材料と加工」分野で木工作品を製作する際の補助具を3Dプリンターで試作し、どのような形状が望ましいのかに関する検討を合わせて行った。

1. 強度試験装置

前報で試作した強度試験装置（旧型）を図1に示す。この装置は、引張試験および集中荷重による曲げ（片持ち梁）試験に対応しており、荷重測定にはMxmoonfree社製のデジタルフォースゲージHP-500（以下フォースゲージ）を使用した。フォースゲージに接続したパソコンで荷重値の変化を読み取ることで、試験材に破壊が生じた際の荷重値は知ることができるが、フォースゲージの昇降を上部に設けた昇降ハンドルの手回しで行っているため、破壊試験で重要な変位量との関係を知ることができないという課題があった。

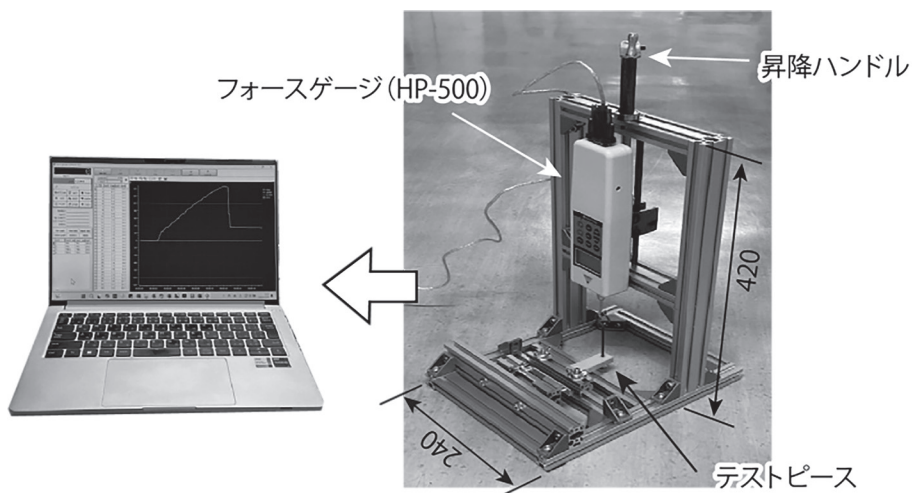


図1 試験装置（旧型）

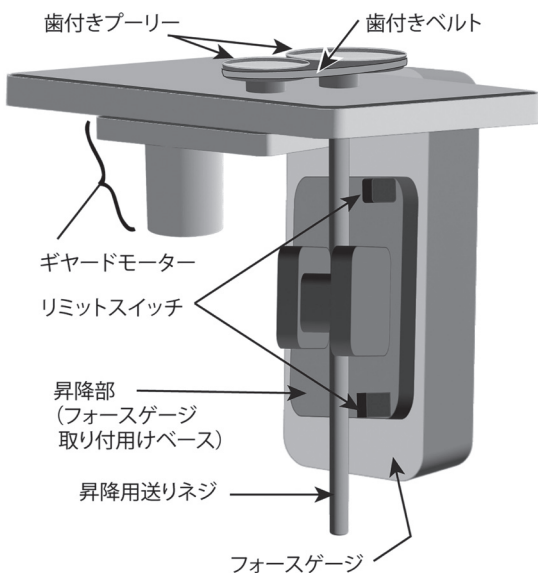


図2 フォースゲージの昇降機構（模式図）

この対策として改良型試験装置では、図2のように昇降ハンドル部分を高トルクで定速回転するギヤードモーター（ツカサ電工，TG-85B-BG-100-KA）と歯付きのベルトプーリーに交換し、昇降部に取り付けたフォースゲージが定速で上下に移動するようにした。

なお、モーターで昇降させる場合は、昇降部が装置本体の上または下フレームに接触して装置本

体を傷めないよう自動停止させる必要がある。この対策として、改良した装置では昇降部の上下端に本体フレームに近接するとモーターを停止させるリミットスイッチを設置した。

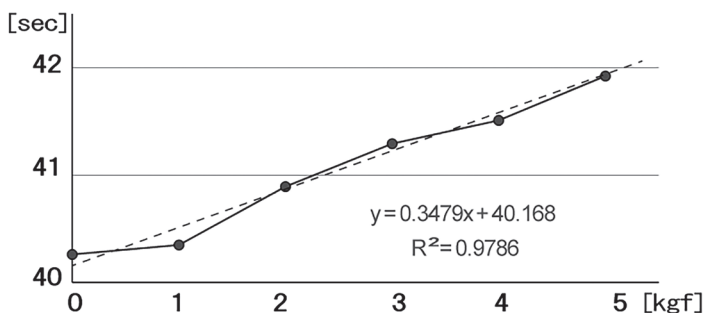
改良した装置における昇降部の送り精度を確認するため、フォースゲージに重りを吊り下げて、30 mm上昇させるのに要する時間をストップウォッチで計測した。結果は図3に示すように、荷重の増加に伴ってフォースゲージの引き上げに要する時間が増える傾向がみられ、図中に加えた直線に極めて近似した。以降で行う実験では、この近似直線をもとに変位量の補正を行うこととする。ただし、用意できた重りが5kgf までであったことを踏まえ、信頼できる変位量の範囲を本研究では荷重 50N までと設定する。荷重が 50N を超えた以降については、降伏点をもって材料の強度評価を行うこととする。

2. 実験方法

はじめに述べたように、今後、技術科の学習においては、全ての分野で情報技術を取り入れた指導が必要になると予想される。これを踏まえ、本研究では、木材を使った材料加工学習（以下、木材加工学習）を対象に、板材の接合に用いるブラケットを3Dプリンターで製作し、その強度測定を行うこととした。

2-1 試験用ブラケット

ブラケットとは、図4のように、部材同士を接合する際に用いる補強材で、接合部材の材質や使用目的によって様々なものがある。今回は、この図4に示すアルミフレーム用ブラケットを参考に、木材加工学習における



荷重値 (kgf)	0	1	2	3	4	5
実測値	40.33	40.23	40.86	41.33	41.49	41.83
(sec)	40.22	40.22	40.8	41.23	41.53	42.01
	40.36	40.23	40.93	41.33	41.6	42.03
	40.14	40.53	40.99	41.38	41.57	41.85
	40.26	40.54	40.89	41.19	41.36	41.89
平均 (sec)	40.26	40.35	40.89	41.29	41.51	41.92

図3 荷重と送り精度
(30 mm上昇させる際の所要時間)



図4 アルミフレーム用ブラケット

板同士の接合に用いる補助具としてのブラケットをいくつか試作し、その形状や3Dプリンターの造形過程が強度に与える影響について検討した。

図5に製作した3種類の試験用ブラケット形状を示す。一つ目は、Lブラケットと呼ばれる最も基本的な形(Lタイプ)、二つ目は、Lブラケットの内側隅に5mmの面取りを設けて、応力が集中しやすい付け根部分に補強を施した形(Mタイプ)、三つ目は、図4に例示した三角ブラケットで、両サイドに筋交い状の補強板を付加した形(Dタイプ)となっている。この製作には、FDM方式の3Dプリンター(Flashforge社製Creator 3)を使用した。造形時の条件を表1に示す。

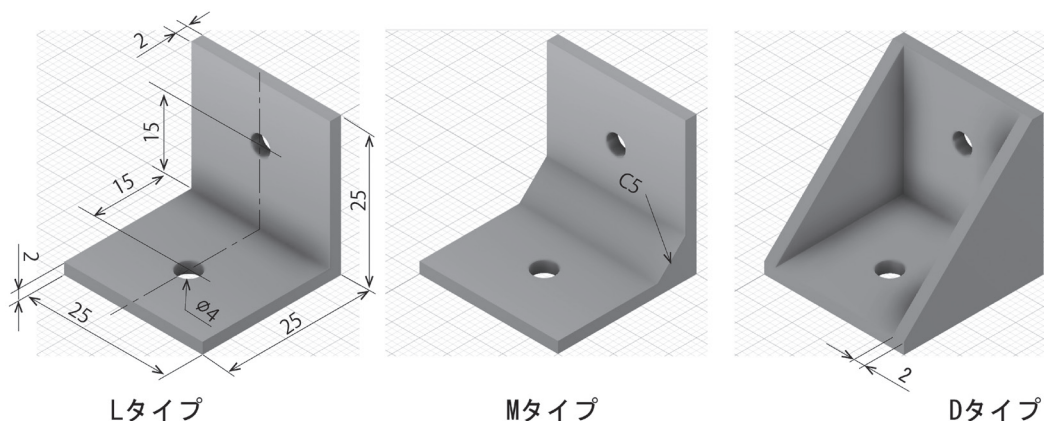


図5 試験用ブラケット

表1 3Dプリンターによる造形条件

スライサーソフト:	FlashPrint 5.8.7	充填率:	15 %
装置:	Flashforge Creator 3 (右側 エクストルーダーのみ使用)	モデル内部充填パターン:	六角形
使用樹脂:	Flashforge PLA (1.7mm)	プリント速度:	60mm / s
積層ピッチ:	0.18 mm	樹脂を出していないときの速度:	80mm / s
シェル・カウント:	3	ヘッド温度:	200 °C
ラフトの有無:	有	プラットフォーム温度:	45°C

2-2 試験方法

FDM方式の3Dプリンターでは、樹脂を塗り広げる水平方向と樹脂を積層する垂直方向とで、造形物の強度に違いがあることが経験的に知られている。3Dプリンターでブラケットを製作するにあたっては、作業時にブラケットが壊れたり、作品の強度が損なわれたりしないよう、造形方向に対する力の向きを意識することが必要となる。本研究では、図6のように加わる力の向きに関し、垂直な積層方向をV、水平な塗広げ方向をHとしてブラケットの強度を評価するようにした。さらに、ブラケットに加わる荷重については、図7のような圧縮と引張という2方向が想定され、これもブラケットの丈夫さに影響を与えと考えられる。研究では、右図のように、試験装置にブラケットを取り付ける向きを工夫することによって、加える力の向きによるブラケットの強さを測ることにした。

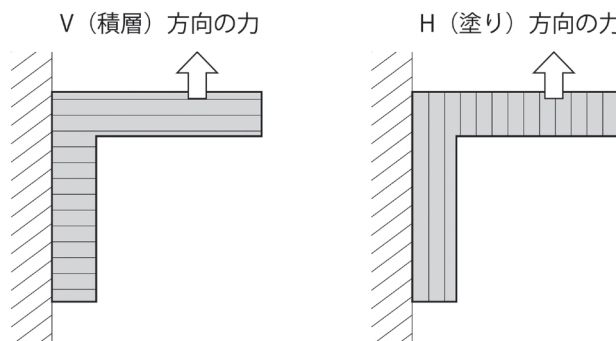


図6 造形方向と力の向き

今回試験の対象としたブラケットをそのタイプお

よび力の向きで整理したものを一覧にして表2に示す。

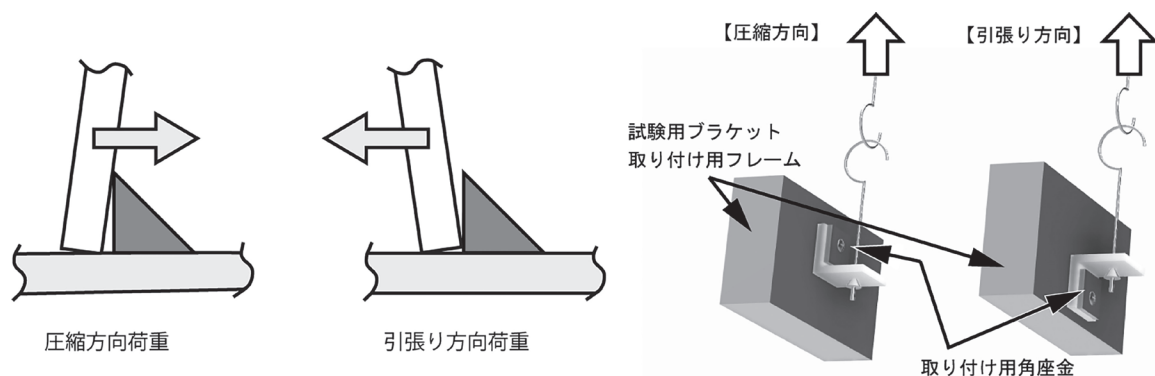


図7 ブラケットに加わる荷重方向と試験方法

表2 試験したブラケットと力の向き一覧

形状	造形方向に対する力の向き	ブラケットに加わる力の向き	試験材名
Lタイプ	積層方向 (V)	引張 (H)	L-V-H
		圧縮 (A)	L-V-A
	塗り広げ方向 (H)	引張 (H)	L-H-H
		圧縮 (A)	L-H-A
Mタイプ	積層方向 (V)	引張 (H)	M-V-H
		圧縮 (A)	M-V-A
	塗り広げ方向 (H)	引張 (H)	M-H-H
		圧縮 (A)	M-H-A
Dタイプ	積層方向 (V)	引張 (H)	D-V-H
		圧縮 (A)	D-V-A
	塗り広げ方向 (H)	引張 (H)	D-H-H
		圧縮 (A)	D-H-A

3. 結果および考察

図8は、ブラケットに加えた力と変位量との関係を表したものである。この図は、補正式が信頼できる50Nを最大荷重値として示しており、耐荷重性能が高いほど変形は少ないとみなすことができる。ただし、いずれの場合においても50Nまでの範囲では、実用上問題となる塑性変形はみられておらず、表3に示す降伏点荷重を併せて考察していく必要がある。

まず、Lタイプのブラケット（図8の実線）をみると、荷重に対する変位量は、3タイプの中で最も大きく、特に圧縮でその傾向が強い。一方で表3をみると、降伏点荷重は、引張よりも圧縮の方が大きく、前者と逆の結果となった。塑性変形後の写真（図9）をみると、引張りの場合は、コーナー部分のみに塑性変形がみられるのに対し、引張りでは3か所に塑性変形が観察された。Lタイプの圧縮では、荷重に対する変形が複数個所で生じるために変位量が大きくなる一方、荷重が分散されることで結果的に塑性変形に至るまでの耐荷重値が大きくなったと考えられる。いずれにせよLタイプについては、変形しやすく耐荷重値も十分とはいえないため、木材加工の接合に用いる補助具としては性能が不十分といえる。

つぎに、Mタイプについてみる。図9に2点鎖線で示した変位量については、全体にLタイプよりも小さくなっており面取りを施した効果がみられる。変形のしやすさは、Lタイプ同様、圧縮の方が大きくなっているが、そのばらつきは3タイプの中でもっとも大きい。

降伏点荷重をみると、Lタイプとは異なり、引張りの方で荷重値が大きくなった。塑性変形後の写真（図10）をみると、引張りの場合、塑性変形は面取りの端で生じている。面取りによってMタイプは、Lタイプよりも応力集中が起きにくい分、塑性変形は生じにくい、限界に達した時に働く力が大きくなるために、一気に材の割れが進んだと考えられる。Lタイプに比べて、変形が小さく耐荷重値が大きくなる理由といえ

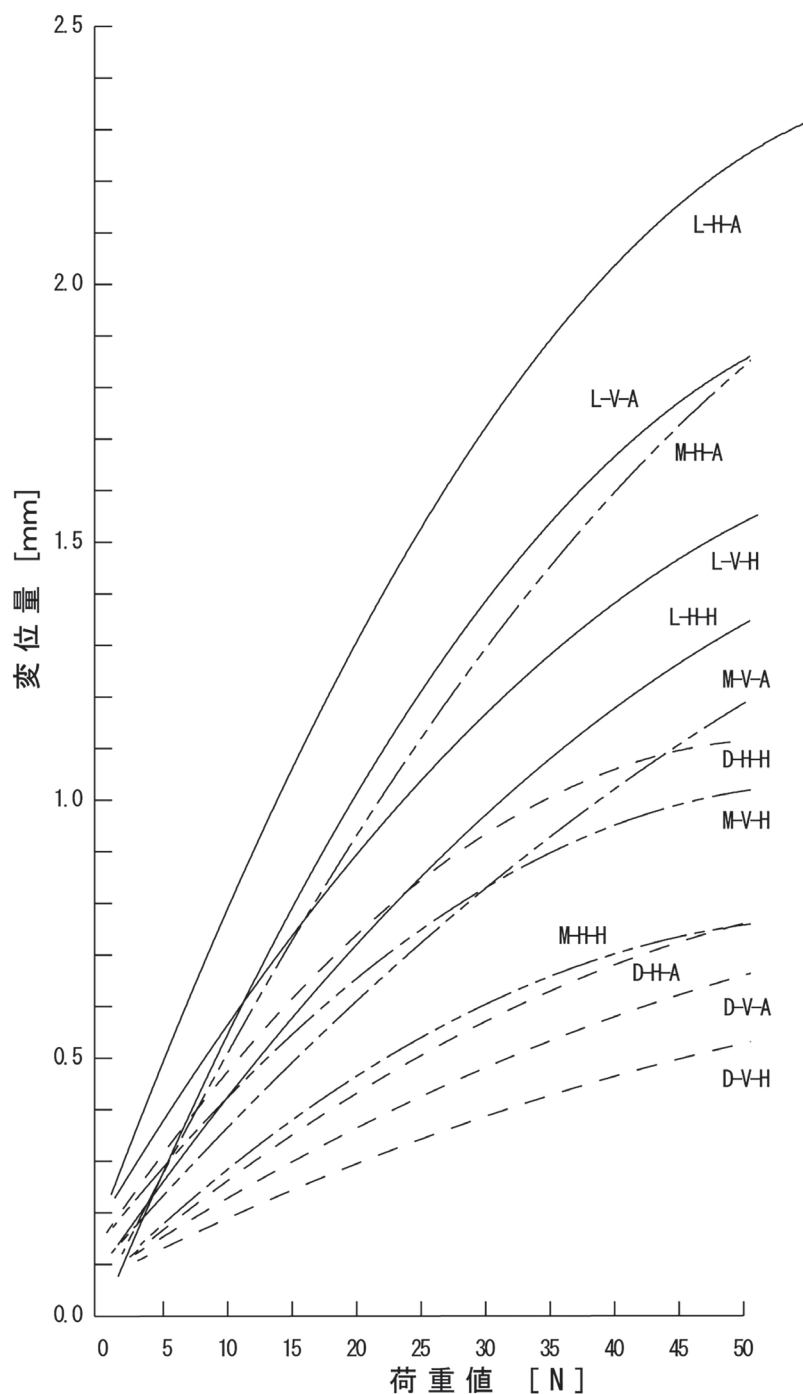


図8 ブラケットに加える荷重と変位量の関係

表3 降伏点の荷重値

試験材名	降伏点の荷重値 (N)
L-V-H	67.7
L-V-A	89.0
L-H-H	62.0
L-H-A	103.9
M-V-H	137.7
M-V-A	85.0
M-H-H	125.5
M-H-A	78.7
D-V-H	—
D-V-A	—
D-H-H	—
D-H-A	—

“—” は、200N を超えても降伏がみられない場合

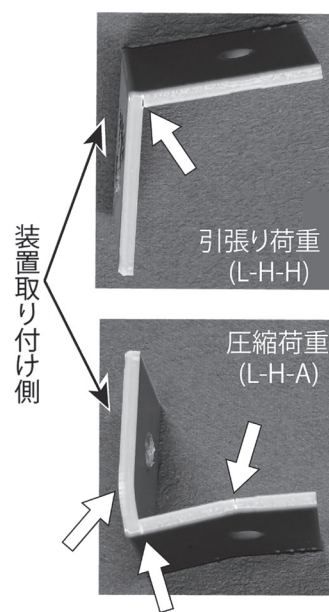


図9 塑性変形後のLブラケット
(白抜き矢印は、塑性変形がみられた位置)

よう。圧縮の場合は、2所で塑性変形が生じており、Lタイプ同様、複数個所で変形が起きることが変位量を大きくさせた要因と考えられる。一方、降伏点については、圧縮の方が引張りよりも荷重値が小さく、Lタイプとは逆の現象がみられた。圧縮荷重の写真を比べると、図9のLタイプでは、ブラケット根元に塑性変形が生じていたのに対し、図10のMブラケットでは、面取りの効果でブラケット根元に塑性変形を生じていないことが観察される。またMタイプでは、試験装置で部材を引き上げるために設けた穴の位置で比較的深い割れを生じており、根元に加わる荷重が減った分、穴の方に強く作用した様子が伺われる。部材にあけた穴は、応力集中による破壊が起きやすい材欠陥部であり、この部分の割れがブラケットの降伏を早めたと考えられる。

Mタイプのブラケットについては、Lタイプよりも強度は増すが期待したほどではなく、バラつきも大きいことから、木材加工学習用の補助具としての性能は不十分と判断せざるをえない。

Dタイプについては、荷重による変位が3タイプ中で最も小さく(図8の破線)、50Nを加えたときの変位量は、最も大きいD-H-Hで約1.0mm、他は0.7~0.8mmとわずかであった。試験後のD-H-Hブラケットを図11に示す。試験中に引き上げ用の穴部分が僅かに持ち上げられる様子が観察されたが、試験後荷重を取り去ると、その変形を視認することはできなかった。両側に設けた補強材は顕著な効果を生んだといえる。Dタイプのブラケットについては、荷重による変形が小さく、耐荷重も圧倒的に大きいことから、木材加工学習用の補助具として、実用性が高いといえよう。

今回試験を行った3タイプのブラケット全体についてみると、積層方向の影響については、今回、明瞭な差をみることはできなかった。図8および表3からうかがえる全体的な様子としては、H(塗り伸ばし)方向に平行な向きの力を加えた場合の方が、V(積層)方向よりも変形が大きく降伏点も低いように見えるが例外も多く、今後の検討が必要である。

終わりに

本研究では、まず前報で課題となった試験装置の信頼性を高めることを主眼に装置を改良し、その効果の確認を行った。改良の結果、得られた補正式で荷重と変位に関する測定の信頼性を高めることができた。ただし、得られた補正式は50Nまでで、今回実測した限りにおいては、十分なものとはいえなかった。装置自体の強度も不足しており、さらなる改良が必要である。

つぎに、FDM方式の3Dプリンターを教育で有効活用することを目指して木材加工学習で使用するブラケットを3Dプリンターで作製し、ブラケットの形状ごとに強度を検討した。その結果、LタイプおよびMタイプは変形が起きやすく強度も不十分で、実用に適さないことが分かった。これに対し、ブラケット両側面に三角の補強材を加えたDタイプは、荷重に対する変形が小さく、今回試験できた最大荷重200Nでは塑性変形を生じないなど実用上の強度も十分と考えられる。

今後は、このDタイプを基本に多様なバリエーションを開発しその使用方法についても検討したい。特にFDM方式の3Dプリンターは、造形精度や強度を高めようとするほど製作に時間を要する傾向があるため、製作時間が短く強度の高いブラケットの形状について、学習における実用性を意識した開発を進めていきたい。

参考文献

- 阿部顕一、インクジェット 3D プリンター造形物の造形精度と強度の報告、神奈川県立産業技術総合研究所 研究報告 No. 23、pp. 13-15(2017)
- 伊藤皓太・佐藤真・増田幸雄、熱溶解積層方式樹脂 3D プリンターにおける造形物の破断荷重の予測、長野県工技センター研報、No. 17、pp. M54-M58(2022)
- 岡村吉永、3D プリンターによる造形物を教育利用するための強度に関する検討、山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要、59 号、pp. 63-68(2024)
- 高橋智・児玉和也、3D プリンター造形物の強度評価と充填構造の設計、石巻専修大学研究紀要、第 31 号、pp. 9-16(2020)
- 文部科学省 (2025) : 中央教育審議会教育課程部会教育課程企画特別部会 (第 8 回) 配付資料,
<https://www.mext.go.jp/content/000360892.pdf>, 最終閲覧日 2025, 9, 2

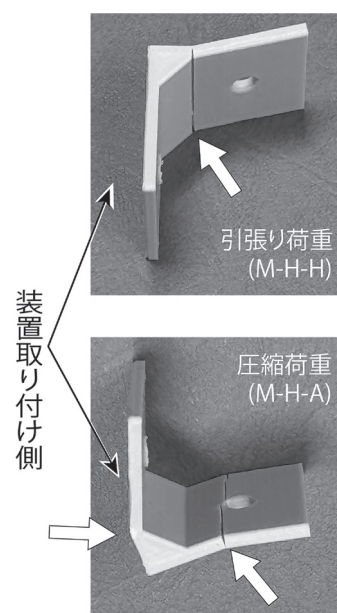


図 10 塑性変形後の M ブラケット
(白抜き矢印は、塑性変形がみられた位置)

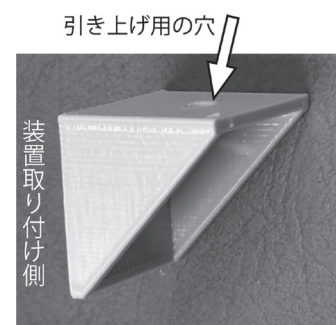


図 11 試験後の D ブラケット
(D-H-H)