

熱溶解積層型3Dプリンタを用いた 機械工学総合設計作品の造形性

関口 宏治* 大野 佳代子* 黒瀬 雅詞**

(2015年11月26日受理)

1. はじめに

3Dプリンタは、デジタルデータから色々な造形物を作製できる製造装置として、近年、注目を集めている。各教育機関でも教材としての導入が検討・開始されており¹⁾、高等専門学校（以下「高専」と略称する。）においても、関連する研究が報告されている²⁻⁴⁾。

群馬高専の機械工学科では、平成21年度より4年の設計製図の授業にて学生が3D-CADソフトを使って設計した歯車減速機のデータをもとに3次元造形機を用いて実体化している。平成25年度からは、熱溶解積層型3Dプリンタを導入し、ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 樹脂やPLA (Polylactic Acid) 樹脂を使った作品を作製している。学生の設計した球形などの複雑な製図図面に対し、短時間で精度の良い造形物を印刷するためには、造形機の設定値の調整が必須である。今回、3Dプリンタの印刷設定値や材料の違いによる造形品の寸法精度や強度特性などについて調査したので、以下に報告する。

2. 研究目的

4年機械工学科の通年授業である設計製図は、1年次から3年次の専門科目で学んだ機械設計法や材料力学などの知識を、学生が各自で総合的に活用するとともに、グループ学習でお互いの解決方法を評価し合いながら3次元造形機を用いて^{5,6)}、チームワークで作品を完成させていく（授業シラバスより⁷⁾）。実践的な問題対応能力を養うために、設計変更などの課題を含め、知的財産権や創造力を活用できる設計力が習得できる科目である。各自が設計した3Dデータを3次元造形機で実体化し、規定寸法を満たしていることなどを確認後、グループごとにその成果をまとめ、年度末に行われる「設計製図発表会」にて教職員を招いてプレゼンテーションを行う。課題は2段歯車減速機であり、4つの歯車と軸、そのハウジングの作製に3次元造形機を用いる。1年間の授業期間のうち、実際に造形物を作製する期間は、12月末から翌年1月末までの約1ヶ月間である。平成23年度の作品は、

石膏パウダータイプの3Dプリンタで作製しており、例えば1辺が200mmの立方体のハウジングとその中に納まる4つの歯車や部品などを印刷して装置から取り出す作業には、2日以上の手数が必要であった。このため、学生約40名が個々に設計したデータの全てを印刷することができず、グループ単位（4人/班）で1つの作品を造形していた。平成25年度は、材料力学研究室（指導教員：黒瀬）に導入された、ABS樹脂対応の熱溶解積層型3Dプリンタ：UP Plus⁸⁾（TierTime Technology社）（図-1参照）を用いて、歯車部分を造形した。



図-1 3Dプリンタ：UP Plus

これにより、1グループで2セットを実体化することが可能となった。平成26年度は、本体の1辺が50mm程度の立方体内に収まるサイズとなるように制限を設け、ハウジングを含む全ての部品をABS樹脂で印刷することにより、学生約40名全員の作品を実体化することができた。

ここで問題となるのはABS樹脂造形物の寸法精度である。造形物が作図寸法よりも大きく作製された場合には、歯車と軸の組み立て作業時に、軸が歯車内径に収まらなくなり、太く印刷された軸を切削する加工処理が必要となる。ただし、印刷時の設定値、配置方向、材料や色の違いなどにより、寸法精度や強度特性の異なることが考

えられる。

以上のような背景から、本研究では、ABS樹脂を使った熱溶解積層型3Dプリンタの造形性を調査することを目的とした。

3. 実験方法

本研究では、3Dプリンタで作製する造形物の寸法精度と強度特性を、使用する材料や印刷時の設定値および配置方向などの違いから調査する。以下にその実験方法を示す。

3.1 造形装置

使用する装置は前述の3Dプリンタ：UP Plusである。現有の3Dプリンタ3種類（他に3D Systems社製CubeX⁹⁾、システムクリエイイト社製Bellulo¹⁰⁾）の中で、著者らが長期間操作しており、最も安定して造形物が作製可能な装置を選択した。

3.2 試験片形状

試験片形状は、プラスチック物性測定の試験規格であるJIS K7139¹¹⁾を参照して決定した。その形状を図-2に示す。

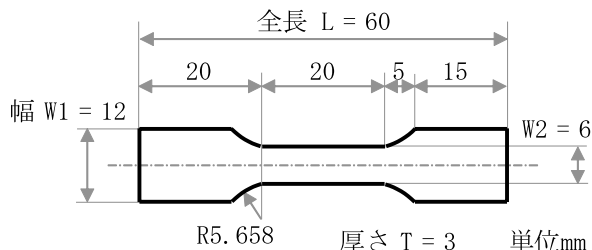


図-2 試験片の形状

この試験片形状の作図には、3D-CADソフトのSolid Works 2014を使用した。STLファイル形式で出力後、パソコンにUSBケーブルで接続された3Dプリンタを制御するソフトウェア UP!(Ver2.13)を用いて造形を行う。

3.3 供試材

実験に使用する材料は、次に示す3社のABS樹脂とした。それぞれの色の違いによる特性についても調査を行う。

- (1) PP3DPオリジナルフィラメント ABS φ1.75mm
色：緑、白、赤
- (2) Winbo社フィラメント ABS φ1.75mm
色：緑、ピンク、水色
- (3) ムトーエンジニアリング社フィラメント
MAGIX ABS φ1.75mm 色：緑、透明

3.4 造形設定

以下に示す造形設定項目の値や配置について、条件を変えて実験を行う。その値を以下に示す。

(1) 積層ピッチ

積層ピッチは0.05mmの間隔で、0.15mmから0.40mmまで指定することができる。今回は、0.15mm、0.25mm、

0.40mmの3種類とする。

(2) 密度

内部密度の設定値は4種類ある。今回は密度の最も高い設定(Max)と、最も低い設定(Min)の2種類とする(図-3)。

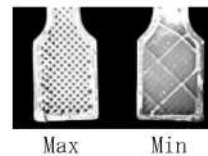


図-3 印刷密度

(3) 外観品質

Fine(細)、Normal(普通)、Fast(粗)の3種類とする。

(4) 配置方向

試験片の長辺(L=60mm)をX方向(装置正面から前後方向)に配置したものと、Y方向(装置正面から左右方向)に配置したものの2種類とする(図-4)。Z方向(高さ方向)の造形は、単純な溶解のみの積層構造となる¹²⁾ため、今回の調査では対象外とする。

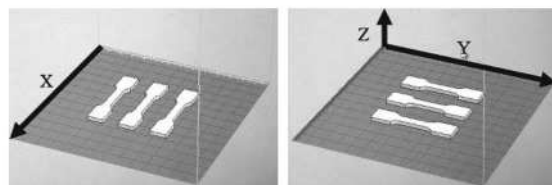
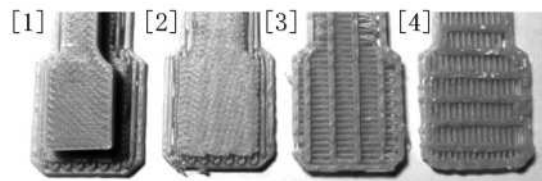


図-4 印刷方向

(5) ラフト

ラフトとは、目的の造形物と印刷テーブルの間に作られる土台(図-5)である。ラフトの有る場合と、無い場合の2種類を設定する。



[1]ラフト付き試験片, [2]ラフトのみ
[3]ラフト底面 配置Y方向, [4]ラフト底面 配置X方向

図-5 ラフト

3.5 実験項目

材料と造形設定の組み合わせは、表-1に示す22通りの条件を設定した。これらについて各3個、合計66個の試験片を作製し、24時間以上室温にて静置後、次に示す実験項目を実施する。実験結果は、各条件の試験片3個の平均値を使用する。

(1) 寸法精度

はじめに、図-2に示す試験片の全長Lと幅W1、W2、厚さTを、電子ノギス(ミットヨ製CD-15AX)を用いて測定し、設計値と実測値の差を計算する。

(2) 重量測定

試験片の重量を、電子天秤(A&D社F2000i(Max=2200g、d=0.01g))を使って測定する。

(3) 引張試験

島津製作所の材料試験機(EZ-S(500N)、AG-IS

(50kN) を使って、試験片の引張強度を測定する。測定条件は、室温、クロスヘッド速度を10mm/minとする。試験片が破断するまでを自動で測定し、試験力とストロークを記録する。併せて、縦弾性係数(N/mm²)と破断伸び(%)、最大引張応力(N/mm²)を求める。ただし、ひずみは平行部長さGLとチャック間距離を同一にして、GLひずみから求めた。

(4) 外観検査

造形物の外観について調査する。

表-1 試験条件の組み合わせ表

No.	材料	ピッチ	密度	色	品質	ラフト	方向
No. 01	(1)	0.15mm	Max	緑	Fine	有	Y
No. 02	(1)	0.15mm	Min	緑	Fine	有	X
No. 03	(1)	0.15mm	Max	緑	Normal	有	X
No. 04	(1)	0.15mm	Min	緑	Normal	有	Y
No. 05	(1)	0.15mm	Max	緑	Fast	有	Y
No. 06	(1)	0.15mm	Min	緑	Fast	有	Y
No. 07	(1)	0.25mm	Max	緑	Fast	有	X
No. 08	(1)	0.25mm	Min	緑	Fast	有	Y
No. 09	(1)	0.40mm	Max	緑	Fast	有	Y
No. 10	(1)	0.40mm	Min	緑	Fast	無	Y
No. 11	(1)	0.15mm	Max	白	Fine	有	Y
No. 12	(1)	0.15mm	Min	白	Fast	有	Y
No. 13	(1)	0.15mm	Max	赤	Fine	無	Y
No. 14	(1)	0.40mm	Min	赤	Fast	無	Y
No. 15	(2)	0.15mm	Max	緑	Fine	有	Y
No. 16	(2)	0.15mm	Max	ピンク	Fine	有	Y
No. 17	(2)	0.40mm	Min	ピンク	Fast	有	Y
No. 18	(2)	0.40mm	Min	ピンク	Fast	有	X
No. 19	(2)	0.40mm	Min	水色	Fast	無	Y
No. 20	(3)	0.15mm	Max	緑	Fine	有	Y
No. 21	(3)	0.15mm	Max	透明	Fine	有	Y
No. 22	(3)	0.40mm	Min	透明	Fast	無	Y

4. 実験結果

4. 1 寸法精度

試験片66個(試験条件22通り×3個)の全長、幅、厚さの寸法を計測した。はじめに、試験片の全長L=60mmに対する寸法誤差を図-6に示す。試験片の長辺の配置をY方向とした試験条件では、一部を除き、誤差が-0.07mmから0.07mmと非常に小さい値で造形できている。先行研究では、ABS材料は造形する形状や条件によって反り易いという問題が指摘されており¹³⁾、収縮が大きいものの造形精度に大きな問題は無いことを確認した。ただし、No. 13の材料(1)赤色とNo. 20の材料(3)緑色は、積層がずれて斜めに造形されていたため、値が大きくなった。

一方、試験条件のNo. 02、03、07、18の4種類は、造形物の長辺をX方向に配置した場合であり、誤差が大きくなっている。つまり今回の設定では、X方向は積層ピッチのサイズに依存して造形が大きくなる傾向となった。

図-7に幅W1=12mmとW2=6mmに対する寸法誤差を示す。グラフ内の数値はそれぞれのMax値を表示した。この場合も全ての試験条件において、作図した寸法よりも大きく造形されている。また、図-6の全長の場合とは逆に、配置がY方向の場合は積層ピッチや外観品質に依存して誤差が大きくなり、X方向の場合では誤差が小さくなる傾向であった。

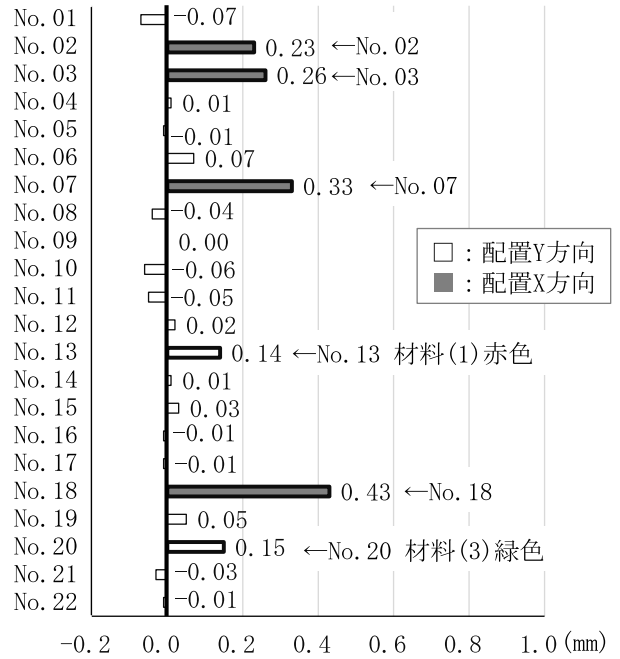


図-6 全長 L=60mm の寸法誤差

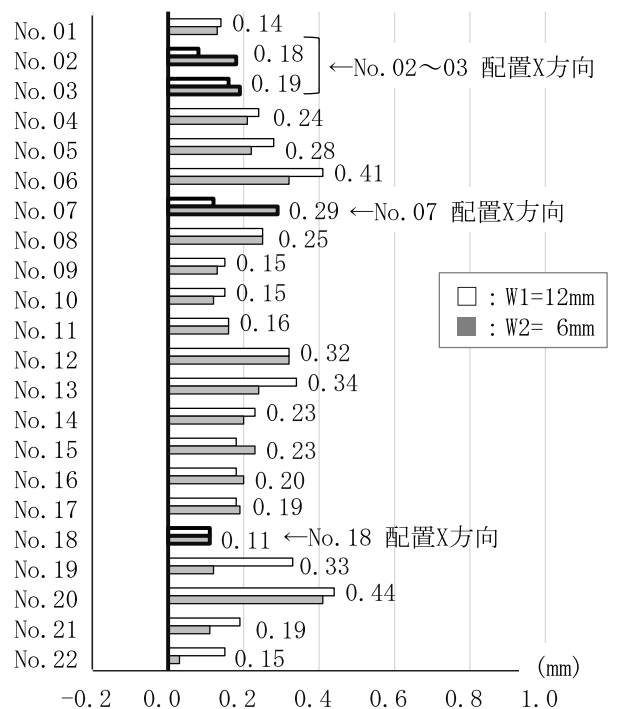


図-7 幅 W1=12mm, W2=6mm の寸法誤差

次に、厚さT=3mmに対する寸法誤差を図-8 に示す。ここでラフト無しの場合と積層ピッチを最大の0.40mmにした場合をハッチングで示すと、寸法誤差が0.32mmから0.77mmと大きくなっている。その他の条件では、0.00mmから0.26mmと少ない誤差で造形され、ラフトを設けた方が精度が良くなり、積層ピッチをノズル径0.4mmと同じ値にすると精度が大きくなる傾向となった。ノズルの先端形状は平面にされており、樹脂を吐出時にはフラットにならしながら成形しているため、積層ピッチと1：1にした方がより良い精度が得られると考えられたが、径を大きくする結果となり、樹脂の吐出量を調整すべきであることが分かった。

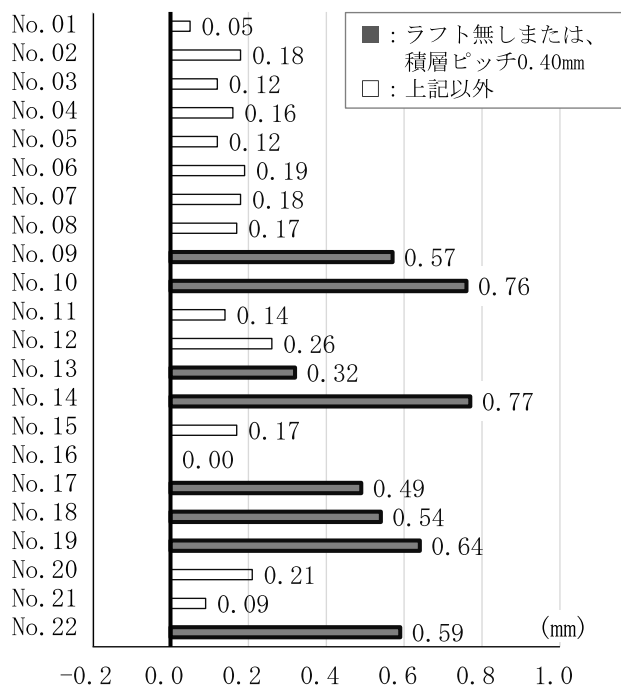


図-8 厚さ T=3mm の寸法誤差

4. 2 重量測定

図-9 に重量の測定結果を示す。積層ピッチ0.15mmでは密度が低いものは重量が少なくなるが、外観品質に条件の違いは影響しなかった。また、ラフト無しの場合には、設計値よりも厚く造形されるため重量が重くなっている。それ以外の条件では、寸法誤差や材料の違いもあるが、平均値は1.57gであった。

4. 3 引張試験

図-10 は、AG-IS (50kN) での引張強度試験の写真である。試験片は、おおむね中央で破断した。

次に、測定した試験力とストロークから求めた縦弾性係数と破断伸びの関係を図-11 に示す。縦弾性係数は、密度には影響されず、材料と積層ピッチの組み合わせにより異なる傾向が見られた。一方、破断伸びは、密度が高いものが大きい値を示した。また、材料と色の違いが

結果に影響しており、外観品質の設定値には相関が見られなかった。

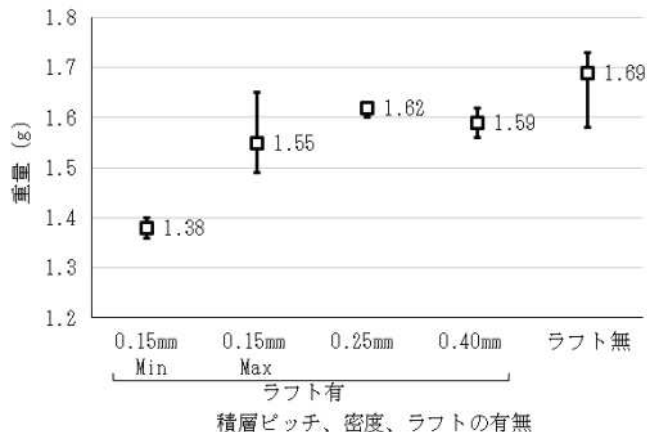


図-9 重量測定結果

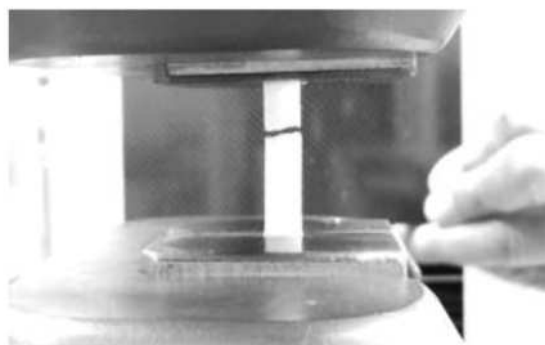


図-10 引張強度試験 (AG-IS)

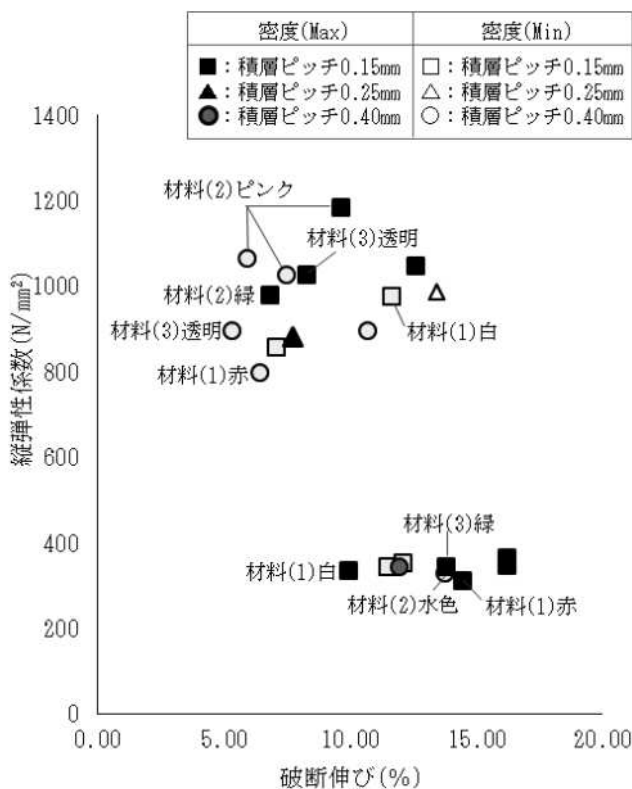


図-11 縦弾性係数(N/mm²)と破断伸び(%)

図-12 に、最大引張応力(N/mm²)と重量(g)の関係を示す。試験条件の積層ピッチと密度によって、グラフのマークを変えて表した。この中で、最も引張応力が高い樹脂は、材料(2)のピンク色であった。この材料を使い、印刷ピッチを最大の0.40mmとしたNo. 17、18の場合が、今回の試験片の中で最大値を示した。また、材料(3)透明色は、No. 21のピッチ0.15mmの結果よりも、No. 22のピッチ0.40mmの数値がかなり小さくなっている。引張応力の最小値は、No. 14の材料(1)赤色の積層ピッチ0.40mmの試験片であった。このように強度は密度と積層ピッチに影響する重量に最も依存していることが分かる。

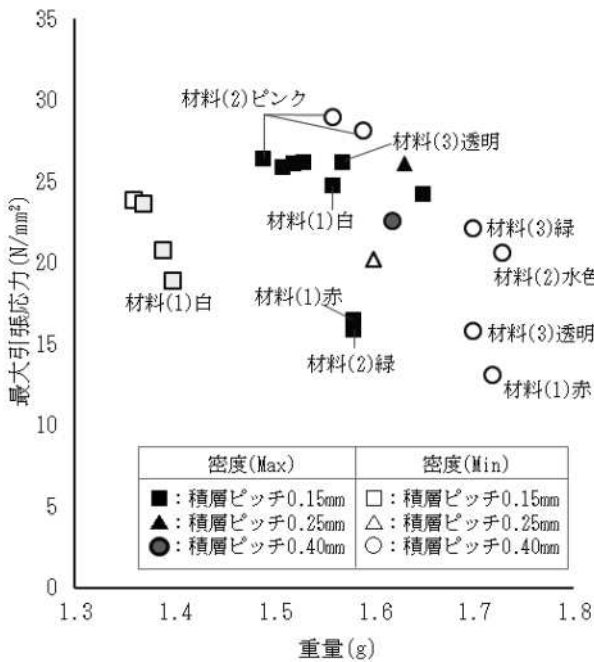


図-12 最大引張応力(N/mm²)と重量(g)

4. 4 外観検査

最後に、造形物の外観についての調査結果を示す。今回作製した試験片では、異なる造形条件の場合でも目視による外観は変わらなかった。しかし、図-13 に示すように材料や印刷ピッチによりラフトが付く面の外観が荒れる場合が見られた。写真上側の下部がラフトであり、写真下側は裏返した試験片のラフト面である。表面が荒れて窪んでいるのが見て取れる。この現象は、試験条件No. 17、18で発生した。材料(2)ピンク色の積層ピッチ0.40mmで造形し、引張応力の値が最も高かったものである。



図-13 造形の荒れ

一方、引張強さが低い材料(3)の透明色には、この造形の荒れは見られなかった。その材料(3)透明色の異なる

密度の外観は図-14 である。写真左側が高密度であり、右側は低密度である。高密度を指定した場合は、その透明性が失われていた。材料の透明感を優先する場合や、強度を優先する場合など、それぞれの目的に合わせて設定する必要のあることを改めて認識した。

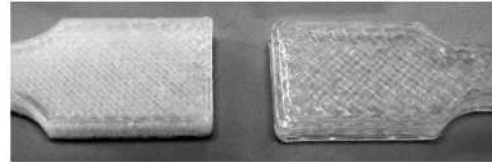


図-14 密度の異なる透明マテリアル

5. まとめ

今回の調査により、熱溶解積層型3Dプリンタの印刷時の設定値や配置方向、材料や色の違いによる、寸法精度と強度の差異を明らかにした。また、印刷時に密度を粗い設定にすることや、印刷の外観品質をFastと指定することで、印刷精度が若干悪くなるものの、材料と時間が短縮できることが分かった。

本成果をもとに、限られた作業期間中に短時間で精度よく実体化できる印刷条件を最適化し、今後の授業支援に役立てて行きたいと考える。

参考文献

- 1) 竹澤聡, 高谷宜世, 高島昭彦, 長松昌男, 中村香恵子, 白濱芳朗: 大学教育における 3D プリンターの教材利用に関する現状と課題, 工学教育 62-4, pp. 45-51 (2014).
- 2) 佐藤一志, 角田 圭佑, 石川信幸: 3D プリンタ造形物の寸法精度と強度, 仙台高専名取キャンパス研究紀要 第 51 号, pp. 5-9 (2015).
- 3) 勝野幸司, 田中裕一, 宮嶋久幸: 3D プリンタによる建築模型の制作, 熊本高等専門学校研究紀要 (5), pp. 69-74 (2014).
- 4) 渡邊孝一, 栗本育三郎: ものづくりにおけるアジャイルシステム開発の実践, 工学教育 62(4), pp. 27-32 (2014).
- 5) 室伏春樹: ICT 機器を活用して玩具を製作する情報科と家庭科の協同題材の提案, 静岡大学教育実践総合センター紀要 23, pp. 61-68 (2015).
- 6) 大高敏男: 設計・開発で価値を生み出す最新 3D プリンター活用実践ガイド 総論 2 工学教育における 3D プリンター利用の現状と可能性, 機械設計 59 巻 7 号, pp16-19 (2015).
- 7) 群馬高専: 平成 27 年度シラバス 4 年機械工学科 科目名 設計製図, <http://www.gunma-ct.ac.jp/Gakusei/syllabus/2015/pdf/8100920004mm.pdf> 2015/11 /19 参照.
- 8) TierTime Technology 社: TierTime, <http://www.tiertime.com/en> 2015/11/22 参照.
- 9) 3D Systems corporation: Rapid Prototyping, Advance Digital Manufacturing <http://www.3dsystems.com> 2015/11/23 参照.

- 10) (株)システムクリエイト：国産プリンタ Bellulo, <http://www.systemcreate-inc.co.jp/products/3pr/r/bellulo.html> 2015/11/23 参照.
- 11) 日本工業標準調査会：データベース JIS K7139 プラスチック試験片, <http://www.jisc.go.jp/app/pager?id=823646> 2015/11/19 参照.
- 12) 竹澤聡, 他：大学教育における 3D プリンターの教材利用に関する現状と課題, 工学教育 62-4, p. 48(2014).
- 13) 古川慈之, 寺岡啓：ハサミの 3D プリンティング, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論集, pp. 577-578(2014).

Moldability and Shape-holding Property on Using FDM 3D printer as Teaching Works in Total Design Education

Koji SEKIGUCHI, Kayoko OHNO and Masashi KUROSE

In this study, we research moldability and shape-holding property by FDM (Fused Deposition Modeling) type 3D printer as teaching works by students in total design education. Its lecture has learned at department of mechanical engineering in fourth grade of National Institute of Technology, Gunma College. Though 3D printer is easy and fast for make objects, it is important for strength and shaping to make design.

The test specimens printed with several direction by FDM 3D printer and made by several color ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene resin). The evaluation examined the correlation between the density, dimensional precision and Stress-strain curves. Elastic modulus measured by general gauge length method. These results valuated dimension errors and tensile strength data of the 3D objects by various materials and conditions of the printer.