

## V 3Dプリンター出力触察立体教材の評価

第Ⅱ章では、視覚障害教育における立体教材の重要性について述べた。第Ⅲ章では普及タイプの3Dプリンターによる立体教材作成法について整理した。第Ⅳ章では、実際に視覚障害教育用の触察立体教材の試作について紹介した。

本章では、本研究の目的の一つである3Dプリンターで作成した造形物の触察用立体教材としての活用という観点から造形物の評価を試みる。

研究計画では、3Dプリンターで出力された造形物がデータ通りのサイズで形成されているかどうかを検証することをめざしていた。しかし、異なったFDM方式3Dプリンターで試作した造形物の寸法をメジャーで測定したところ、顕著な誤差は認められなかった。むしろ、試作品の比較では、表面の滑らかさや凹凸の出具合、触覚的ノイズとなるバリなどの有無などが、機種によって異なっていることのほうが目立っていた。視覚障害教育用触察立体教材の作成という観点からは、むしろそうした造形精度について検証することが実際的であると判断した。そこで、本調査では、触覚の活用を前提とした視覚障害教育用触察立体教材の造形という観点、及びこうした新技術をできるだけ教育現場でも有効に活用していくための情報を提供するという観点から、利用可能なFDM方式の3Dプリンターを用いて出力した造形物における面情報、線情報、点情報のとらえやすさを確認した上で触覚による立体的な形状の判別のしやすさについて比較検証する。

## 1. 目的

触覚活用を前提とした視覚障害教育用触察立体教材という観点から、現在市販されている普及タイプの FDM 方式 3D プリンターで出力した造形物について、手指の探索による立体的形状のとらえやすさを比較する。

## 2. 方法

手指の探索による立体的形状のとらえやすさを比較するために、現在市販されている普及タイプの FDM 方式 3D プリンターを用いて同一の 3 次元データにより評価用造形物を作成し、それらを一対比較法により面、線、点の触覚による情報入手においてノイズが少なく、立体的形状がとらえやすいものを回答させた。

### (1) 調査対象

本調査の対象は特別支援学校（盲学校）小学部 4 学年、6 学年の点字を常用している児童 10 名である。調査に際しては、保護者、本人に同意を得た。

### (2) 造形に用いた 3D プリンターと樹脂素材

造形に用いた 3D プリンターと樹脂素材は以下の表のとおりである。

表 V-1 評価に用いたプリンターの機種と樹脂素材

3D プリンター機種	用いた樹脂素材	
MF2000（ムトーエンジニアリング）	ABS	PLA
AFINIA H480（Microboards Technology）	ABS	PLA
Replicator 2（MakerBot 社）	なし	PLA

### (3) 実験材料として造形に用いた 3 次元データ

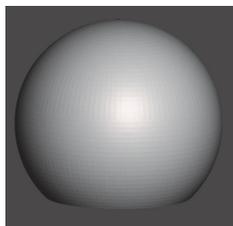
全体的立体形状をとらえるためには、面情報、線情報、点情報が手がかかりとなる。面情報という観点から球面と平面が含まれる立体を用意した。平面が含まれる立体については、立体形状の複雑さという観点から正 4 面体、正 20 面体の 2 種類を用いた。

また、面の凹凸の状態の表現力という観点から、点字の形状を造形することにした。点字については、プリンターの出力精度を確認するために通常のサイズのものと同拡大したサイズの 2 種類を造形した。具体的な仕様は以下のとおりである。

なお、点字の凸表示については、同じデータで横置きと縦置きで出力したところ、横置きの場合は、点字の凸が明瞭に表示されにくかったため、縦置きで出力したものを採用することにした。

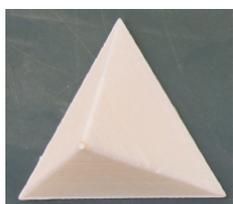
材料① 球

直径 50mm の球。安定させるため下面をフラットにカットした形状にしたデータ。局面の出力状況の比較に用いる。



材料② 正 4 面体

1 辺 64mm の正 4 面体のデータ。平面及び線（辺）の出力状況の比較に用いる。



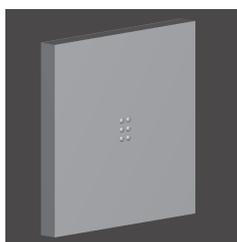
材料③ 正 20 面体

1 辺 42mm の正 20 面体のデータ。平面及び線（辺）の出力状況の比較に用いる。



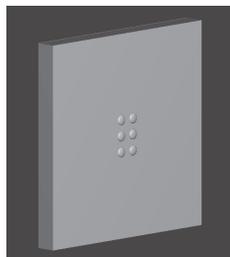
材料④点字（1.5mm 径）縦置き

50mm 四方の板にサイズの直径が 1.5 mm の点字を 6 点配列した「⠠」(め) を 1 文字記し、縦置きにデザインしたデータ。点の出力状況の比較に用いる。



材料⑤ 点字 (2.5mm 径) 縦置き

50mm 四方の板にサイズの直径が 2.5 mm の点字の「⠠」(め) を 1 文字記し、縦置きにデザインしたデータ。点の出力状況の比較に用いる。



#### (4) 3Dプリンターでの出力

上記 3D データを FDM 方式 3D プリンター 3 機種で出力した。素材は、ABS 樹脂、PLA 樹脂の 2 種類で出力することを原則としたが、Replicator 2 は、PLA 樹脂にのみ対応しているため、ABS 樹脂では造形できなかった。

各 3D プリンターで実験材料を出力するにあたって、以下の条件を統一した。

サポート：用いない。

ラフト：有に設定する。

z 軸の造形ピッチ：0.2mm に統一する。

各プリンターで造形した触察実験材料の画像を図 V-1 から図 V-5 に示した。

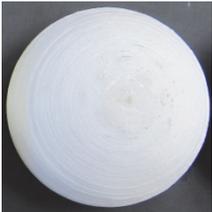
AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)
				

図 V-1 各プリンターで造形した触察実験材料「球面」

AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)

図V-2 各プリンターで造形した触察実験材料「正4面体」

AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)

図V-3 各プリンターで造形した触察実験材料「正20面体」

AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)

図V-4 各プリンターで造形した触察実験材料「点字 2.5mm 径 (縦置き)」

(全体の画像では、凸の状態が不明瞭なため⦿の部分のみ拡大して示した。)

AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)

図V-5 各プリンターで造形した触察実験材料「点字 1.5mm 径 (縦置き)」

(全体の画像では、凸の状態が不明瞭なため⦿の部分のみ拡大して示した。)

(5) 手続き

各3Dプリンター及び素材で5種類の実験材料を出力した。それぞれの種類について、機種あるいは素材の異なる2つの実験材料をランダムに組み合わせて、机上に提示した。それらを手指を使って観察してもらった。立体的形状がとらえやすい方を選択させた。その際、面についてはどちらの方が滑らかに感じるか、線については辺の部分がどちらの方がスムーズな直線としてとらえられるか、また点についてはどちらの方が立体の頂点としてとらえられるかという観点を示しバリや突起などのノイズの有無も確かめるように教示した。作業時間に制限は設けなかった。両者を触察後、どちらの方が立体的形状や触情報をとらえやすい造形物であるかを総合的に判断して、その結果を口頭で回答してもらった。併せて、触り心地について印象を尋ねた。

3. 結果

(1) 球

球状の造形データによる各プリンターでの造形材料の触察評価の結果は表V-2に示したとおりである。Replicator 2を用いてPLA樹脂で出力した造形材料が最も好評であった。ついでAFINIA480のPLA樹脂、ABS樹脂が好評であった。MF2000による造形評価はPLA樹脂、ABS樹脂のいずれも低かった。

表V-2 球の評価結果

	AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)	評価 (良い)
AFINIA H480 ABS (I)		9	6	9	4	28
MF2000 ABS (II)	1		4	4	2	11
AFINIA H480 PLA (III)	4	6		9	1	20
MF2000 PLA (IV)	1	6	1		2	10
Replicator 2 PLA (V)	6	8	10	8		32
	12	29	21	30	9	

(2) 正 20 面体

正 20 面体の造形データによる造形材料の触察評価の結果は表 V-3 に示したとおりである。Replicator 2 を用いて PLA 樹脂で造形したものが最も好評で、AFINIA H480 の ABS 樹脂で出力した造形物が次いで好評であった。MF2000 の PLA 樹脂による造形は特に評価が低かった。

表 V-3 正 6 面体の評価結果

	AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)	評価 (良い)
AFINIA H480 ABS (I)		9	7	9	3	28
MF2000 ABS (II)	1		6	7	1	15
AFINIA H480 PLA (III)	2	3		5	2	12
MF2000 PLA (IV)	0	2	2		0	4
Replicator 2 PLA (V)	6	8	8	9		31
	9	22	23	30	6	

(3) 正 4 面体

正 4 面体の造形データによる造形材料の触察評価の結果は表 V-4 に示したとおりである。AFINIA480 の ABS 樹脂で出力した造形物が最も好評であった。ついで Replicator 2 の PLA 樹脂による造形が続いていた。MF2000 の造形評価は ABS 樹脂、PLA 樹脂ともに低かった。

表V-4 正4面体の評価結果

	AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)	評価 (良い)
AFINIA H480 ABS (I)		10	6	9	6	31
MF2000 ABS (II)	0		4	8	0	12
AFINIA H480 PLA (III)	3	6		7	4	20
MF2000 PLA (IV)	0	1	1		0	2
Replicator 2 PLA (V)	4	8	6	9		27
	7	25	17	33	10	

(3) 点字 (1.5mm 径) 縦置き

径が 1.5mm の点字パターンの造形物の触察評価の結果は、表V-5に示したとおりである。AFINIA480 を用いて PLA 樹脂で出力した造形結果が最も好評であった。ついで Replicator 2 の PLA 樹脂による造形、AFINIA480 の ABS 樹脂による造形が続いていた。この点字パターンでは、MF2000 の ABS 及び PLA による造形も同水準で高い評価を得た。

表V-5 1.5mm 縦の評価結果

	AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)	評価 (良い)
AFINIA H480 ABS (I)		5	4	5	5	19
MF2000 ABS (II)	5		4	3	7	19
AFINIA H480 PLA (III)	6	6		8	4	24
MF2000 PLA (IV)	5	7	2		4	18
Replicator 2 PLA (V)	5	3	6	6		20
	21	21	16	22	20	

(4) 点字 (2.5mm 径) 縦置き

点字の一点の直径が 2.5mm 縦の点字パターンの造形データを出力した造形物の比較結果は表 V-6 に示した。これは、Replicator 2 による PLA 樹脂での造形が最も好評であった。AFINIA480 による PLA 樹脂素材の造形が次に好評であった。MF2000 の PLA 樹脂による造形物の評価が最も低かった。

表 V-6 2.5mm 縦の評価結果

	AFINIA H480 ABS (I)	MF2000 ABS (II)	AFINIA H480 PLA (III)	MF2000 PLA (IV)	Replicator 2 PLA (V)	評価 (良い)
AFINIA H480 ABS (I)		5	4	5	4	18
MF2000 ABS (II)	5		3	7	5	20
AFINIA H480 PLA (III)	6	7		6	3	22
MF2000 PLA (IV)	5	4	4		2	15
Replicator 2 PLA (V)	6	5	7	8		26
	22	21	18	26	14	

#### 4. 考察

AFINIA H480、MF2000、Replicator 2 という 3 機種 of FDM 方式 3D プリンターで出力した造形物の立体的形状のとらえやすさについて、触察用教材という観点から比較した。

(1) 形状について

曲面の滑らかさ、触り心地の良さという観点からは、Replicator 2 (Maker Bot 社) を用いて PLA 樹脂で出力した造形結果が最も好評であった。MF2000 の造形評価は ABS 樹脂、PLA 樹脂どちらの素材の場合も低かった。

平面の滑らかさという観点からは AFINIA480 で ABS 樹脂を素材として用いたものが最も好評であった。AFINIA480 では、水平面、垂直面の平坦さという点で顕著な差がなかったことも高得点の要因だと思われる。Replicator 2 の場合は、平面は滑らかであったが、垂直面の出力にばらつきが目立った。MF 2000 は、粗さがめだち、垂直面の表現力は 3 機種中最も粗さが目立った。

以上のことから、Replicator 2 は局面の出力が得意であり、AFINIA H480 は平面や

辺（線）が明瞭な造形物を出力できるといえる。MF2000 はバリがあったり、本来平面であるところに歪みがあったりするなど安定感に欠けるところがあった。これらの点が低い評価に至った大きな要因であると思われる。

#### （2）点字の「⠠」の造形について

点字の「⠠」の造形結果については、本研究で使用した3種の装置と素材では、AFINIA480のPLA樹脂を素材として用いたもの、Replicator 2のPLA樹脂を素材として用いたものが好評であった。この造形については、MF2000の評価も低くなかった。ただし、これはデータを縦置きにして出力した場合の結果である。通常のように横置きにしてデータで出力した造形では、「⠠」と触知する事が困難なものが多く、今回の対象とすることができなかった。FDM方式3Dプリンターでの点字利用の可能性について点字文字列や点字による文章などの出力状況や出力方法の影響などの面からその精度について、さらに丁寧に検証していく必要があるといえる。

#### （3）造形樹脂素材について

ABS樹脂とPLA樹脂を造形材料として用いた。樹脂の違いが触察に及ぼす影響については比較対象が少ないこともあり、今回の結果から明言することはできないが、以下に本調査内でわかったことを記す。同一機種での評価を比べると、AFINIA480の場合は、ABS樹脂の方が評価は高い傾向が認められた。MF2000でも、どちらかというともABS樹脂の方が触り心地という点では評価の高い傾向が認められた。他方、Replicator 2はPLA樹脂に特化した機種であるが、AFINIA480と同水準で高い評価を得ていた。ABS樹脂とPLA樹脂では溶解温度等が異なるなど特性に違いがある。どちらの樹脂も用いることができる機種も多く出回っているが、機種によって得意とする造形材料が異なっていること、樹脂の切り替えの際の設定の変更が造形結果に影響してくるなどなどに留意する必要があることを示している。

実証に用いることができた機種は、計画していた機種数よりも少なくなってしまうが、3機種を比較しただけでも機種や用いる造形材料によって、立体的な表現や触り心地が異なっていることが明確に示された。このことは、触察教材作成を目的として3Dプリンターを導入する場合は、納入前に出力サンプルで形状や触り心地について、十分に検証する必要があることを示している。

視覚的な印象と触覚的な印象は似ている面もあるが、実際に触れてみないと確認できないところもある。より簡便に確実に検証する方法を開発していくことが必要だといえる。

#### （4）まとめ

FDM方式3Dプリンターは、すでに50種類以上の機種が市販されている。本調査

で用いた機種は限定されているものの、触察立体教材という観点からみると、3Dプリンターによる造形物の精度は一様ではなく、そのとらえやすさも異なっているということが示された。明確な結論を得るためには、さまざまな条件での多角的な分析がさらに必要であるが、視覚的にも面の滑らかさや線の凹凸の状態などが、機種によって異なっていることは明白であった。視覚障害教育機関でこうした機器を納入するにあたっては、形状等を十分に吟味してその選択を慎重に行う必要があることを示している。また、こうした情報を教育機関等で単独で得ることは難しい。メーカーから示されている性能だけでなく、実際の出力の結果からその性能が判断できるような情報を提供する仕組み作りが必要だといえる。

本調査は、同一のデータで出力しても、プリンターごとにその造形精度が異なっていることを確認することを最優先課題としており、3Dプリンターの性能を比較評価し、優劣をつけることを目的としているわけではない。企業の積極的な取組などにより、視覚障害教育機関等での3Dプリンター導入への関心が高まってきていることもあり、今後触察教材作製を目的として3Dプリンターの導入が進んでいくものと思われる。機器選定にあたって配慮すべき点を示す事ができた点で、本調査は小規模なものであったが、めざしていた目的は達成することができたといえる。

2009年にFDM方式の特許が公開されたことにより、廉価な3Dプリンターが登場することになった。しかしながら、FDM方式のプリンターは、造形精度が低いこと、造形に時間がかかることなどの制約も多く、学校教育機関で利用する機器としては必ずしも望ましいとはいえない側面もある。2014年にはより精度の高い造形が可能な「レーザー焼結法」の特許も公開されており、FDM方式以外の方式による普及型プリンターの開発も進んでいく事が予想される。FDM方式についてさらに検証を進めるとともに、FDM方式以外のプリンターの開発状況についても情報を収集し、触察教材作製という観点から実証的な研究を進めている必要があると思われる。

## 文献

- (1)American Printing House for the Blind (1997). Guidelines for Design of Tactile Graphics. <http://www.aph.org/edresearch/guides.htm>. (2014年12月1日閲覧)
- (2)Eric Gaba (2008). File:Tissot indicatrix world map equirectangular proj.svg. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tissot\\_indicatrix\\_world\\_map\\_equirectangular\\_proj.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tissot_indicatrix_world_map_equirectangular_proj.svg). (2014年12月1日閲覧)
- (3)Robert Johnston (2010). Planetary maps. <http://www.johnstonsarchive.net/spaceart/cylmaps.html>. (2014年12月1日閲覧)
- (4)Mirela Kahrimanovic, Wouter M. Bergmann Tiest, Astrid M. L. Kappers (2011). Discrimination thresholds for haptic perception of volume, surface area, and weight. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 8, 2649-2656.

- (5)日本盲人社会福祉施設協議会点字出版部会点字地図記号委員会（1984）. 歩行用触  
地図製作ハンドブック. 日本盲人社会福祉施設協議会.
- (6)金子健, 大内進（2005）. 点字教科書における図版の触図化について一触図作成マ  
ニュアル
- (7)YAHOO!JAPAN（2013）. さわれる検索.  
Sawareru.jp/report/1/（2014年10月1日閲覧）

（大内 進・手嶋吉法・山田毅）