



3Dプリンタの導入

1. はじめに

ラピッドプロトタイピング(rapid prototyping)の1種として発展した3Dプリンタは、現在では製造業を中心に教育、先端研究等幅広い分野に普及しています。日本造船技術センター(以下SRC)では、昨年度3Dプリンタを導入し、水槽試験時に使用する省エネ付加物等の製作に活用してまいりました。今回は、3Dプリンタの原理と共に今回SRCで導入した機器と導入事例についてご紹介したいと思います。

2. 3Dプリンタの原理

3Dプリンタとは、ラピッドプロトタイピングの中でも小型且つ安価な装置のことを指します。ラピッドプロトタイピングとは、製品開発において、試作品(prototype)を高速(rapid)に製造する技術の総称です。積層造形法と呼ばれ、3次元データを細かな断面間隔でスライスし、スライスした断面形状を積み重ねて製作するという製造手法は共通するものの、使用する材料や断面形状の製作方法により、表1のような様々な装置が開発されています。

表-1 ラピッドプロトタイピングの種類¹⁾

光造形法	紫外線を照射することにより硬化する液体樹脂を用いた方法。
粉末焼結法	素材粉末を層状に敷詰め、高出力のレーザービーム等で直接焼結する方法。ナイロン等の樹脂系材料や青銅、銅、ニッケル、チタンといった金属系材料等が利用できる。
粉末固着法	インクジェットプリンタのように微小な接着剤を粉に吹きかけながら造形する方法。澱粉や石膏等の材料が利用されることが多い。
熱溶解積層法	熱可塑性樹脂を高温で溶かし、積層させることで立体形状を作成する方法。ABS樹脂、ポリカーボネート樹脂等が利用できる。
紙積層法	紙を切抜いて積み重ねることでモデルを作る方法。スライスデータに沿って紙を切抜き、熱を加えながら接着剤を使用して押付け積層させる。木材の代わりに用いることもある。
インクジェット法	インクジェットプリンタと同じ要領で、ヘッド部から微小な樹脂、ワックスや接着剤等の液滴を噴射、又は噴射し紫外線を照射して造形する方法。

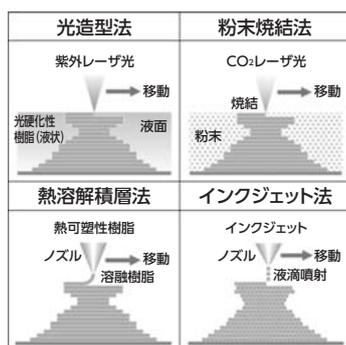


図-1 ラピッドプロトタイピングの造形方法²⁾

3. 導入機器の紹介

導入機器は、造形精度や造形後の処理の簡便さ等を考慮し、KEYENCE社製のAGILISTA-3100としました。導入機器の仕様を表2に、外形を図2に示します。

図3の模式図のように造形物と造形ステージの間に空間がある場合、造形物が落下してしまい造形できません。造形時一時的にサポート材で土台を作り、造形していきます。造形終了後、不要になったサポート材を除去します。AGILISTA-3100は水につけるだけでサポート材を除去でき、後処理の手間がかかりません。その様子を図4に示します。また、積層ピッチが15 μ mと高精細であり、翼形状の端部等の薄肉形状も十分対応可能です。導入検討時に試作造形した翼形状の写真を図5、図6に示します。

表-2 導入機器仕様³⁾

型式	AGILISTA-3100	
造形方式	インクジェット方式	
造形サイズ	297×210×200mm (A4サイズ×200mm)	
解像度	635×400dpi	
Z解像度	高分解能	15 μ m
	標準	20 μ m
モデル材	AR-M2 (透明樹脂)	
サポート材	AR-S1 (水溶性樹脂)	
外形寸法	W944×D700×H1360mm	

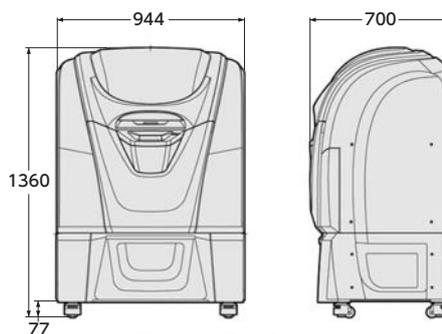


図-2 外形寸法³⁾



図-3 モデル材とサポート材³⁾



図-4 後処理状況(サポート材の除去)³⁾

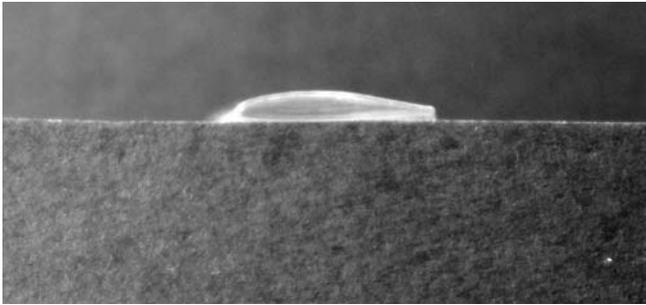


図-5 翼断面形状(上面)

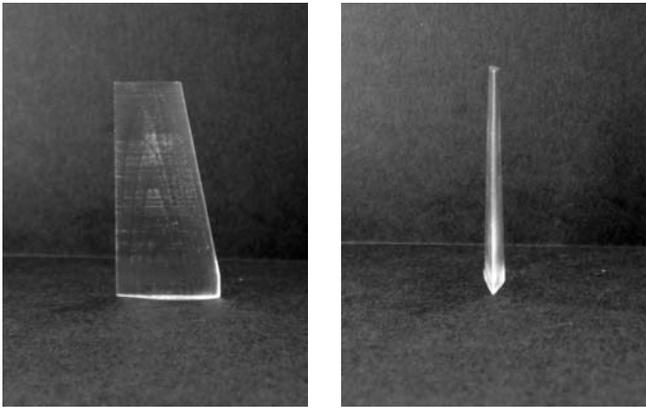


図-6 翼断面形状(側面)

4. 導入事例

3Dプリンタ導入後、試作品を含め90ケース以上を造形し水槽試験に活用してまいりました。造形実績を表3に示します。表中の“その他”とは、ダクト型やステーター型といった船体に取り付けるタイプの省エネ付加物有り無し試験を実施する際、裸殻に戻すために使用するダミーの船体ブロック等を分類しています。

表-3 造形実績

形状タイプ	造形ケース数
バルブ型	14
舵フィン型	4
ステーター型	23
ダクト型	12
船体フィン型	4
試作品	15
その他	21
計	93

試作品として自航試験用のプロペラを造形してみましたのでご紹介します(写真:図7~図8)。造形サイズは、 $x \times y \times z$: 約165mm×約165mm×約23mmです。造形したプロペラは、手で曲げると0.8R付近から翼先端にかけて撓む程度の強度でした。強度と性能確認を目的に、サポート材除去処理後POT試験を行いました。POT試験ではプロペラの破損等はありませんでしたが、POT試験後に行ったボラード試験の際、翼の一部に損傷が見られました。POT試験については問題なく計測できましたので、試験精度については通常使用しているアルミ製の同一プロペラの試験結果との検証を行っていきます。

今後もお客様のあらゆるご要望にお答えしていくべく挑戦を続けていきたいと思います。(試験センター戸谷祐季)

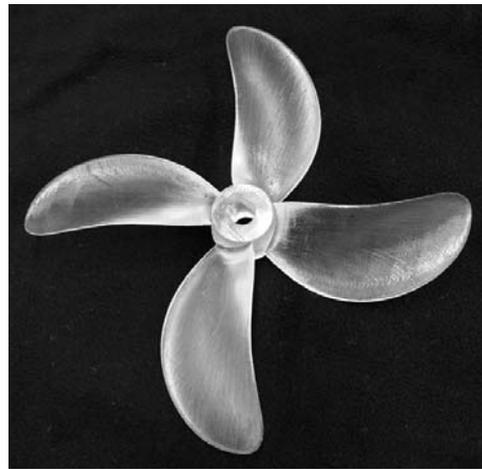


図-7 試作プロペラ全体像

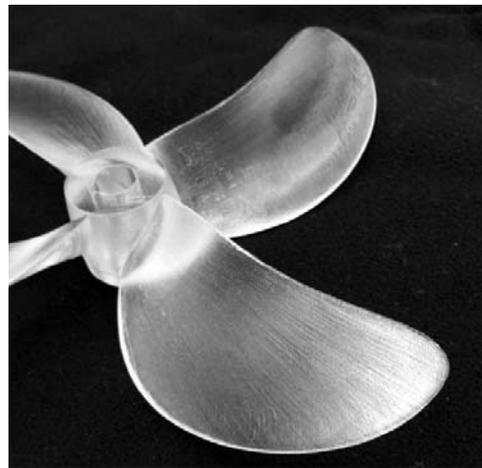
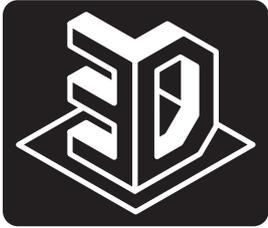


図-8 試作プロペラ翼端部

参考資料

- 1) ICI Design Institute Inc./ラピッドプロトタイプングの種類
<http://www.ici-design.co.jp/service/RPmodel.html>
- 2) インクル株式会社HP/積層RP モデルの造形方法
<http://www.incle.co.jp/rpstack2.html>
- 3) KEYENCE 株式会社HP/Agilista
<http://www.agilista.jp/>
- 4) 株式会社オブジェクト・ジャパン/インクジェットベースの3Dプリンタを活用したラピッドプロトタイプングの新たな前進
http://jp.objet.com/Portals/15/PDF/WhitePaper/WTP_new%20materials_template_120610a_JP.pdf



3Dプリンタの現状と未来

1. はじめに

ラピッドプロトタイピング(rapid prototyping)の1種として発展してきた3Dプリンタは、医療や建築、教育や先端研究等幅広い分野に普及し、最近では家庭用の安価な機種も普及しつつあります。日本造船技術センター(以下SRC)では、3Dプリンタを導入し水槽試験時に使用する省エネ付加物等の製作に活用しており、SRCニュース(No.93)でご紹介しております。

今回は、その後のSRCでの製作事例と共に水槽試験への更なる活用を目指し、大型模型製作への3Dプリンタ活用について検討した例をご紹介します。

2. 3Dプリンタとは

2.1 発展の経緯

従来の製品設計では、製品の外観や性能の評価を行うために粘土(クレイモデル)や木を用いた試作品製作が行われてきました(図1、図2)。しかしながら、これらの試作品製作には時間やコストがかかる点がネックとなっていました。

このような状況の中、試作品(prototype)を高速(rapid)に製作する技術としてラピッドプロトタイピングが発展してきました。かつては熟練者による手作業が中心だった試作品製作は、3次元の設計データから直接製作可能なラピッドプロトタイピング技術により、従来の数十分の1まで時間を短縮できるようになったとも言われています。今では試作品製作だけでなく、医療分野での術前検討用モデル(図3)や建築分野での建築模型(図4)、先端研究分野でのテストパーツや治具といった用途に幅広く使用されています。3Dプリンタとはラピッドプロトタイピングの中でも小型で且つ低価格の装置を対象とした呼称です。



図1 クレイモデル¹⁾



図2 モックアップ²⁾



図3 術前検討用モデル³⁾



図4 建築模型⁴⁾

2.2 造型原理

ラピッドプロトタイピング(3Dプリンタ含)は別名、積層造形法と呼ばれます。積層造形法とは、製品の3次元CADデータを細かな断面間隔でスライスし、断面形状(薄板)を積み重ねることにより立体モデルを製作する手法です。使用する材料や積層方法によって、光造形方式、インクジェット方式、粉末焼結方式、熱溶解積層方式等様々な方式があります。代表的な方式の特徴を(1)~(4)に、造形原理のイメージ図を図5~8にまとめました。

(1) 光造形方式

- 紫外線レーザーで液体樹脂を1層ずつ硬化させ積層する。
- 歴史・実績ともに豊富な方法。
- 微細かつ高精度な造形が可能。
- 樹脂単価が高く、重量のある造形には不適。
- 耐候性が低い。特に太陽光に弱い。
- 樹脂槽が必要なため大型。専用の造形室や付帯設備が必要。

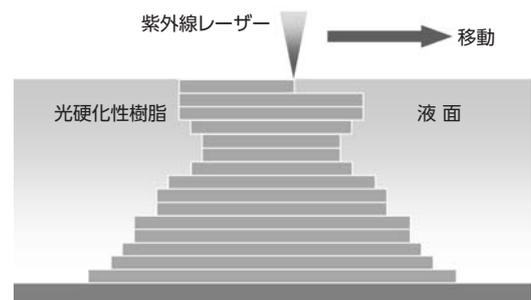


図5 光造形方式原理

(2) インクジェット方式

- プリンタヘッドから樹脂を噴射し直後に紫外線ランプで固める。
- 精度が高く、滑らかで微細な造形が可能。
- 他の方式に比べ、造形スピードが速い。
- 造形物が大きくなる場合、高さ方向の精度が相対的に低い。
- 耐久性、耐熱性が弱い

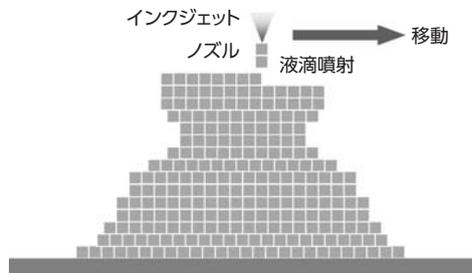


図6 インクジェット方式原理

(3) 粉末焼結方式

- 素材の粉末をレーザーで加熱し焼き固めて積層する。
- 金属粉末が使用可能であるため、造形物の耐久性が高い。
- 表面がざらざらした仕上がりになる。
- レーザー照射装置が必要であり、大型、高価。
- 専用の造形室や付帯設備が必要。

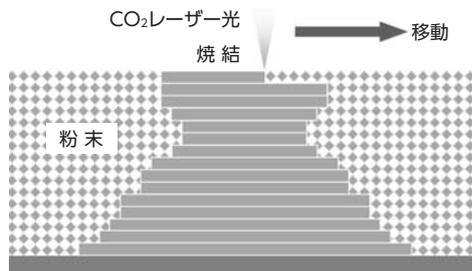


図7 粉末焼結方式原理

(4) 熱溶解積層方式

- ノズルから熱で溶解した樹脂を吐出し積層する。
- 強度のある材料が使用可能。材料選択の幅も広い。
- 経年劣化が少なく寸法も安定している。
- 基本特許が切れているため、廉価な普及機が登場している。
- 光造形等に比べると層間の段差が目立つ。
- 寸法精度が低い。
- 造形スピードが遅い。

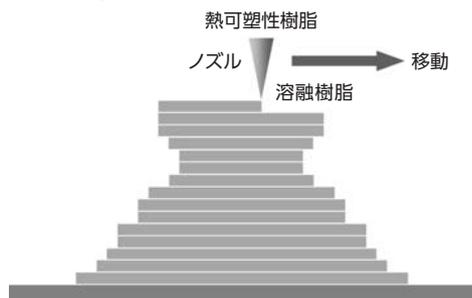
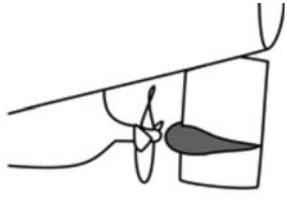
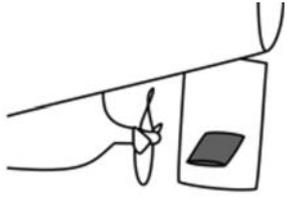
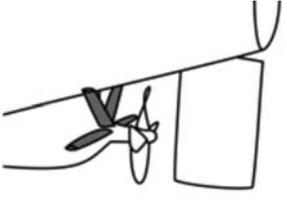
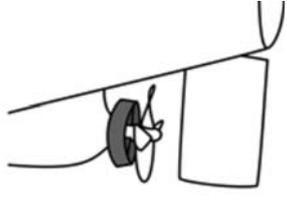
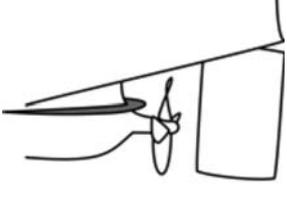


図8 熱溶解積層方式原理

3. SRCでの導入事例

近年の燃費高騰への対処もさることながら、環境問題への観点からも海運、造船業界では船舶からの温室効果ガス排出抑制に向けた様々な取組が始まっています。このような状況の中、水槽試験においても様々な省エネ付加物を装備した試験が多く行われてきています(表1)。省エネ付加物は、実船サイズでは数mの大きさですが、SRCで水槽試験を行う際には数十mm程度の大きさになります。形状も複雑化の傾向にあり、従来の方法では製作が間に合わない状況になりつつあります。

表1 省エネ付加物⁴⁾⁵⁾

バルブ型	
	舵のプロペラシャフトセンターラインの延長線上付近、またはその付近にバルブを取付け、プロペラ回転流やハブ渦による損失を回収して推進効率を向上させる。
舵フィン型	
	舵のプロペラシャフトセンターラインの延長線上付近に翼型のフィンを取付けたもの。プロペラ後方の回転流エネルギーを回収し、推力に変換する。
ステーター型	
	プロペラ前方の船尾に複数枚のフィン(翼)を放射状に取付けたもの。プロペラ回転方向と反対方向の回転流を与えることにより、プロペラ後流の回転エネルギー損失を減少させる。
ダクト型	
	円形またはそれに類した形状のダクトをプロペラ直前に取付け、船尾流場の整流化及びプロペラ前方から流入する流れを加速する。
船体フィン型	
	平板または楔形の細長状のフィンを船体外板に取付けたもの。主に伴流利得の改善を目的とする。

このような状況を打開するため、SRCでは2012年から3Dプリンタを導入し、現在は省エネ付加物の製作を中心に活用しています。導入からの製作実績を表2に示します。水槽試験では、省エネ付加物有り無しの試験を行う際、ステーター型やダクト型といった船体に取り付けるタイプの省エネ付加物では省エネ付加物を装備した後に裸殻に戻して試験を実施することがあります。このような場合、省エネ付加物を装備していない裸殻の船体ブロックを製作し、省エネ付加物のブロックと差替えることで対応しています。表2の“その他”には裸殻に戻すための船体ブロック等を分類しています。

表2 造形実績

省エネ付加物	実績数
バルブ型	31 (13)
舵フィン型	27 (16)
ステーター型	51 (19)
ダクト型	23 (7)
船体フィン型	16 (5)
試作品	15 (0)
その他	54 (21)
合計	217 (81)

※()内は2014年度に製作したもの

また、SRCでは昨年度1500mm(長さ)×270.4mm(幅)×130.7mm(高さ)のMIBS船型模型を製作しました(図9)。これは展示用として製作したもので、船体を2分割で製作しています。



図9 展示用模型

4. 3Dプリンタ活用の展望

ここまで述べてきたように、水槽試験の中で3Dプリンタは、主に船尾付加物や舵付加物など比較的小型(100mm×100mm程度)な模型の製作に使われています。では将来的にはどのような発展が考えられるのでしょうか？

一つは大型化、もう一つは高強度化が考えられると思います。大型化することにより、模型船を高精度かつ迅速に製作できる可能性があります。また強度を増すことにより、キャビテーション試験等に使用する模型プロペラを製作することも可能かもしれません。

ここでは主として大型化に焦点を当て、SRCが標準として製作しているLppm=6.0~7.0m程度の模型船を3Dプリンタで製作する可能性について検討します。

4.1 3Dプリンタの造形精度

表3に各造形方式に対する造形精度をまとめました。造形精度に優れた造形方式は(1)の光造形方式および(2)のインクジェット方式であることが分かります。(4)の熱溶解積層方式は一度溶解した樹脂を造形直後に冷却する性質上、寸法収縮が発生しやすく、精度上の問題となるものと考えられます。(3)の粉末焼結方式は、使用する粉末の粒子径により造形物の精度限界が決定されてしまいます。

表3に示すとおり、光造形方式とインクジェット方式で6m模型を造形した場合の誤差は6~12mmとなります。これはITTCの模型船精度基準(0.05%Lpp以下)を上回り、現状の造形方式で6mの模型船を一体で造形することが可能だったとしても、精度に関し何らかの改善が必要なことが分かります。

表3 造形方式と造形精度

造形方式	誤差(1in辺り)	誤差率	6m模型誤差
	mm	%	mm
(1) 光造形	0.025~0.060	0.1~0.2	5.9~11.8
(2) インクジェット			
(3) 粉末焼結	0.13	0.5	30.7
(4) 熱溶解積層	0.25	1	59.1

4.2 3Dプリンタで使用される材料

模型船に一般的に使用される材料は木またはパラフィンです。世界的に見ると木製模型が主流ですが、日本では加工性、リサイクルの容易さなどからパラフィンを主材料とした模型が標準となっています。SRCではパラフィンを木製合板の骨組みで強化した“パラ・ウッド”と称する構造で模型船を製作しています。

これに対し3Dプリンタで使用できる材料は、アクリル、エポキシ、ABS、PP(ポリプロピレン)、PLA(ポリ乳酸)など多岐にわたり、一部には金属粉末や、石膏、珪砂等を使用するものもあります。

表4に代表的な材料の物性値を示しました。現用の材料(合板、パラフィン)については強度に関わる資料が少ないため、杉材の値も参考に記しています。パラフィンの曲げ強度はSRCが過去に行なった曲げ強度試験によるものです⁷⁾。

(1) 比重

現在、模型船製作に使用している材料が全て水より軽いのに対し、3Dプリンタ用材料はPPを除き、水より重い材料が使われています。最も重いABSではパラフィンの1.3~1.8倍、SRCで現在使用しているアクリル系の材料でも1.3倍の比重となります。

(2) 強度

表を見るまでも無く、パラフィンは他の材料に比べ強度的に劣ります。しかし、加工性が非常に高く、容易にリサイクルできるメリットがあるため、前述のとおり構造材として合板を組み合わせ、そのデメリットを補っています。従って水槽試験用の模型船の強度は木材の強度(合板または杉材)を目安とすることが適当でしょう。

3Dプリンタで使用される材料は、引っ張り、圧縮、曲げ、どの項目でも杉材や合板のそれを上回っており、十分な強度があると考えられます。

しかし前述のとおり現用の材料より比重が重く、かつ後述するコストの問題も有り、3Dプリンタ製模型船では重量を現状以下に抑える必要が出てきます。このため外板厚さを含め、3Dプリンタに適した模型船の構造を検討する必要があります。

(3) 線膨張率

熱による材料の膨張を示す線膨張率は、杉材の場合では、繊維方向で0.3~0.6、それと垂直な方向で3.0~6.0とされています。合板では繊維の方向が種々組み合わされているため、線膨張率はこの中間程度を想定すれば間違いのないものと思われま

す。3Dプリンタ向け材料の線膨張率は全て杉材よりも大きい値を示しており、最大のPPでは $10.0 \times 10^{-5}/K$ となります。これを6m模型に換算すると0.6mm/°Cとなります。夏場には、製作時の気温と試験水槽の水温の間に10°C程度の差が生じることが考えられるため、前述のITTCの精度基準を考慮した場合、熱膨張に対し何らかの対策を行なう必要が生じます。

(4) 耐水性(加水分解、吸水率、等々)

3Dプリンタ材料の加水分解について詳しく調べた資料はありません。しかしメーカーへの聞き取りの結果では、24時間程度では特に大きな問題は無いのではないか、という実際の経験に基づいた回答がありました。吸水率はABS、アクリルが0.2~0.6重量%(24h)とやや大きく、現在製作しているような小型の模型では特に問題は無いと考えられますが、模型船に使用する場合、慎重に検討する必要があると考えられます。

表4 3Dプリンタ材料の物性

	材料(3Dプリンタ)				材料(現用)			
	アクリル	エポキシ	ABS	PP	パラフィン	合板	杉	
比重	1.17-1.20	1.11-1.40	1.61-1.21	0.90-0.91	約0.9 ^{*1}	0.4-0.7	0.3-0.4	
引っ張り強さ	Mpa	48-73	27-89	23-55	31-41	—	—	51-75
圧縮強さ	Mpa	73-125	103-173	45-52	38-55	—	—	26-42
曲げ強さ	Mpa	73-131	89-145	66-96	41-55	2-3 ^{*1}	32-46	30-75
線膨張率	10 ⁻⁵ /K	5.0-9.0	4.5-6.5	6.5-9.5	8.1-10.0	約11 ^{*1}	—	0.3-0.6 ^{*2}
								3.0-6.0 ^{*3}

※1:配合により変化 ※2:繊維方向 ※3:繊維と垂直方向

4.3 大型模型の製作コストと製作時間

ここでは現在販売されている3Dプリンタを使用して6mクラスの模型船を製作した場合のコスト(材料費)と製作時間を試算してみます。

表5には現在販売されている3Dプリンタの最大造形サイズ、使用材料を造形方式別にまとめています。最大の造形サイズは、3Dプリンタ(1)、光造形方式による1500×750×550mmです。模型船を製作するには幅、高さはほぼ満たされていますが、長さについては最低この4倍が必要です。

表5 造形方式と最大造形サイズ

造形方式	造形最大サイズ	材料	材料価格(千円/Kg)
(1) 光造形	1500×750×550	エポキシ系樹脂	20~30
(2) インクジェット	490×390×200	アクリル系樹脂	30~50
(3) 粉末焼精	550×550×750	金属・ナイロン	50~100
(4) 熱溶解積層	914×609×914	ACS・PLA	6~18

表5には材料価格も示しています。これより3Dプリンタ(1)により6mサイズの模型船を製作した場合の価格を試算します。船型は $C_B \approx 0.82$ の肥大船、 $L_{pp} \approx 6.2m$ です。材料は当該3Dプリンタ専用のエポキシ樹脂系の材料(比重;1.16、曲げ強度;62~72MPa、材料費;25000円/kg)を使用します。3Dプリンタ(1)では実際は1.5mまでしか造形できませんが、現状の仕様そのまま筐体の長さだけ大きくし、6.2mの出力が可能となると仮定して試算しました。なお、この模型船はパラウッドにより重量505kgで製作された実績があります。

パラウッド構造で作られた模型船の強度は、合板で作られた内型で支えられているものと仮定します。この合板製の内型の重量を従来の実績より180kgと仮定します。エポキシ樹脂の比重は合板の2.11倍、曲げ強度は1.72倍(表4より)とすると、エポキシ樹脂の合板に対する比強度は0.815となります。これらの数値より、3Dプリンタ製模型船の重量は221kg、平均外板厚は16.8mmと推定できます。この場合、材料費は約552万円で、パラウッド製模型船よりかなり高価なものとなりました。

一方造形時間については形状に左右される部分が多いため、簡単に推定することはできません。3Dプリンタ(1)は1時間の造形で100mm×100mm×8mmのパネルの造形が可能ということが分かっています。かなり乱暴な推定にはなりますが、これを利用してパネル状の部品を張り合わせるイメージで船体形状を造形するという仮定で試算してみました。対象模型船の表面積と平均外板厚みより試算すると、模型船1隻の造形時間は2266時間(=3.1ヶ月)となり、これも現実味の無い結果となっています。

5. 3Dプリンタによる 大型模型製作の可能性と課題

既存の3Dプリンタメーカーに5m以上の大型模型製作の可能性についてヒアリングを行なったところ、以下のような回答を得ました。

- 現状、6m級の大型模型を製作可能な3Dプリンタは存在しない。
- 3Dプリンタによる大型模型の製作は従来技術の延長として可能。
- 造形スペースの大型化、筐体の大型化が必要。

これらの回答と以上の検討結果を総合すると、大型模型製作用3Dプリンタの開発課題としては以下が挙げられます。

- 1) 大型模型製作に適した材料の開発
 - 大強度、軽量、低コスト
- 2) 大型模型製作を可能とする筐体の開発
 - 造形スペースの環境管理(温度、湿度等)
- 3) 高精度な造形を可能とする製造方法の開発
 - 環境による変形が少ない材料
 - ヘッドの複数化
- 4) 造形時間の短縮
 - ヘッドの複数化

この中でも特に“造形時間の短縮”と“低コスト材料の開発”は最重要の課題です。この2点について技術的なブレークスルーがなければ3Dプリンタによる大型模型の製作は実現しないと考えています。

6. まとめ

3Dプリンタ業界へのヒアリングを通して見えてきたことは、3Dプリンタで大型模型を製作しようという研究開発が低調であるということです。これは精度のよい大型模型を製作するというニーズが殆ど無いことに起因します。大型模型の需要があっても殆どがデザイン試作用であり、精度は必要ありません。1m程度の部品を分割して造形し、最後に組み立てれば事足ります。従って今後も大型模型用の3Dプリンタが市販される可能性は低いものと考えています。

一方、数少ないながらもまったく別のニーズから大型3Dプリンタの研究が行なわれています。南カリフォルニア大学では災害用や宇宙空間での住宅建設を3Dプリンタで行なう“Contour Crafting”というプロジェクト⁸⁾が進められています。このプロ

ジェクトの目標は230m²の家を20時間で建設するというもので、精度の問題を別にすれば模型船製作より高い要求仕様の研究です。

現段階では3Dプリンタによる大型模型の製作については否定的な結論になりましたが、ここで検討した課題、前述のプロジェクト等、最新の情報を引き続きフォローし、水槽試験用模型製作の効率化に取り組んでいきたいと考えています。

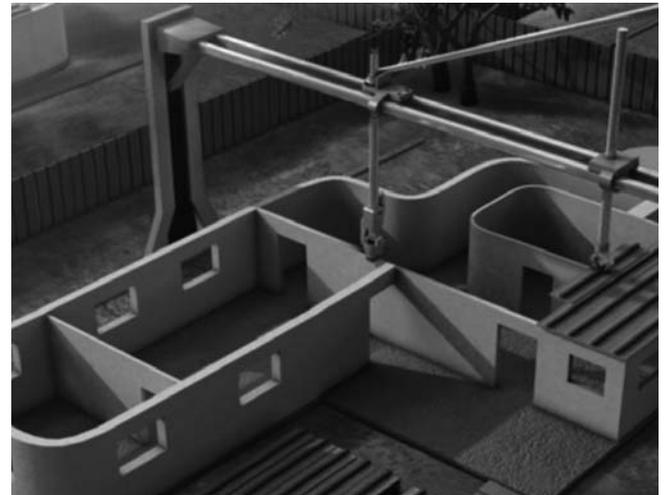


図10 Contour Craftingプロジェクト

参考資料

- 1) RESERCH DESIGN STUDIO HP
<http://www.rds-design.jp/products/?id=1246348068-504395>
- 2) http://blog.livedoor.jp/bow_field/archives/cat_122623.html?p=2
- 3) 株式会社 ファソテック HP
<http://biotexture.com/gallery/item#5>
- 4) <http://ijet.dgblog.dreamgate.gr.jp/e106566.html>
- 5) KEYENCE株式会社、「国産高精細3Dプリンタ アジリス導入事例 vol.03」
- 6) 「船型性能改善のための省エネ装置(その1)」、SRC News No.91 p.16-18、2012
- 7) 吉成他、「模型船用パラフィン材の曲げ強度試験結果について」、日本造船技術センター技報第7号、P.4-13、1979/10
- 8) <http://www.contourcrafting.org>

(試験センター技術部技術課 内田 麻木)
(試験センター技術部 金井 健)