
3Dプリント用高耐水性材料技術と応用展開としての3Dプリンターを活用した水力発電

Highly Water-Resistant 3D Printing Material for Hydropower Generation Using Additive Manufacturing

齋藤 啓*
Akira SAITO

清水 孝幸*
Takayuki SHIMIZU

尾崎 大輔*
Daisuke OZAKI

要 旨

発電能力が1,000 kW以下の「小水力発電」は、新たな発電として日本各地で再度注目を集めている。この小水力発電は水量に応じた最適な羽根形状の追求や発電効率の向上など技術開発が望まれている。しかし、既存工法で造る従来の羽根ではコストや納期の観点から検討が進んでいない。検討を重ねるには樹脂材料を使った3Dプリンターの活用が考えられるが、実使用に耐えられる材料がなかった。その理由は、従来の3Dプリンターは試作品での利用を前提としていたため、最終製品への適用事例が少なく実使用に耐えられる樹脂設計がほとんどなされていなかったからである。上記課題を解決するため、耐水性に優れるアクリル樹脂を採用した。アクリル樹脂は反りが発生しやすく、液相光造形法の自由液面方式では従来使用されていなかったが、ポリオール系添加剤を用いて改良することで耐水性に優れた3Dプリンター材料を実現した。その結果、3Dプリンターでの水車羽根設計を複数検討することができた。

今回の検証では、従来の金属製水車と同等の性能を達成したことから、今後の発展に期待が持てる。長期にわたる実証検証を初めて下水処理場施設で実施したので、それらの内容についても報告する。

ABSTRACT

Small-scale hydropower generation is attracting attention as an alternative source of energy in Japan. Technological developments are needed to improve the structure of the water wheel and power generation efficiency of the original in the installation environment; however, this has been hindered by the high cost and long manufacturing period of metal turbine. Although 3D printers have been used to fabricate prototype turbine in studies, none of the materials could withstand use in actual environments. To address this problem, we have developed a 3D printer material with excellent water resistance by improving the acrylic-based material with polyol additives. We examined high-efficiency water turbine blades created using a 3D printer and determined that they could achieve performance equivalent to that of conventional metal water turbines. Thus, we were able to conduct long-term verification testing at a sewage treatment plant facility for the first time.

* 未来デザインセンター TRIBUS推進室
TRIBUS Office, Future Design Center

1. 背景・課題

1-1 小水力発電

小水力発電とは、1,000 kW以下の発電を行うもので、ダムのように水を貯めることなくそのまま水の流れを利用する発電である。例えば、一般河川、上下水道、農業用水路など水が現在無駄に捨てられているエネルギーを有効利用することができる。古くから稲作農業が盛んであった日本では、農業用水路を巧みに活用し水の位置エネルギーを運動エネルギーとして水車の回転の力に変換して臼をひくことでそば粉などを生産していた。130年前からは、その動力でモーターを回すことにより発電し、地域の電力として活用されていたのが小水力発電の始まりであり、主に螺旋式水車や下かけ式水車が使われていた¹⁾。経済の発展とともに治水が進み、大量の水を貯蓄し放出するダムの建設が進んだ。ダムの落差と大量の水を生かした大型の水力発電は、主要な電源を構成しており、1960年には国内の50%を担っていた。現在では経済の発展とともに電気の需要が増え、火力発電・原子力発電を中心に需要を賄っているが、水力発電も8%とまだまだ主要な電源として寄与している²⁾。一方、大型ダムを活用した水力発電については、導入ポテンシャルが尽きているが、小水力発電と呼ばれるものが日本の各地で新たな発電として再度注目を集めている。環境を大きく破壊せず、カーボンフリーの再生可能エネルギーといわれる小水力発電はまさに石炭・石油の非可逆的な原料がいない自然の力を活用するものとして、最近、世界中で脱炭素の試みに合わせて普及が進みだした。特に太陽光発電や風力発電と比較して24時間常時発電するため、小水力発電には高い設備利用率（50%～70%）、低い出力変動、技術の成熟性がメリットとして挙げられる³⁾。一方で、小水力発電は、大型の水力発電と比較して設置環境や水車の技術が異なることから、軽量化や発電効率の向上や設置技術の向上といった技術開発が必要である。そのため、現状では、事業性・資金調達要因などいくつかのハー

ドルを乗り越えてようやく設置が実現している状況であり⁴⁾、Table 1に示すように、ポテンシャルがあるにもかかわらず小水力発電装置の設置数は海外に大きく水をあけられている状態である。

Table 1 The number of hydro energy plants (above and below 1,000 kw) installed in Germany, Austria, Sweden, France, Italy, and Japan.³⁾

	Germany	Austria	Sweden	France	Italy	Japan
Below 1,000 kW	7325	2127	1692	1355	1270	547
Above 1,000 kW	404	406	383	796	966	1443

今回、我々は許認可などのハードルが下がり普及が期待される下水道放流渠を利用した小水力発電について検証する。下水処理場では、ごみや砂を沈殿させた下水の汚れを微生物の力で分解するプロセスがある。この際に、タンク内に酸素を送り込み微生物を活発に働かせる目的で、約75 kWh/1,000 m³の電力が必要であり、年間電力費は約1,100億円にも相当する。そのエネルギーコスト低減は省エネの観点からも研究・本格実用化が急務とされている。下水道の放流渠には1～3 m程度の落差が存在しており、処理水が計画的に放流されていることから、未利用の再生可能エネルギーとして小水力発電の導入が可能であり期待されている⁵⁾。一方で、下水道に小水力発電を設置した実績のある水車メーカーのシーベル社へのヒアリングにより次の3つの理由から普及が進んでいないことが分かった。①落差が低いことから水車効率向上が必要、②軽量化によるメンテナンスや交換負担低減が必要、③海に近い河川が多いために錆に強い材料で実施する必要がある。これらを解決するため、水車部分を樹脂化することが考えられる。小水力発電のように水量に応じて羽根の形や大きさが一品一様となるものでは、量産がメインの樹脂成型を用いると費用がかかり、切削加工では細部まで加工することが難しい。そこで、今まで検討がほとんどされていなかった、水車部分への3Dプリンター造形物の適用を検討した。3Dプリン

ターについては次節で詳細を述べるが、樹脂は水を吸収してしまう問題があるため、水を吸収しにくい3Dプリンター材料を新たに開発する必要があった。

1-2 3Dプリンター・光硬化性樹脂

光造形法は、30年前に当時名古屋市工業研究所の小玉氏により発明され、その後、アメリカの3Dシステムズ社や日本のシーメット社によって実用化された。以後、光造形法に端を発した各種3次元積層造形（Additive Manufacturing: AM）装置が種々開発され、開発コストの削減、開発工期の低減に大きく寄与している。現在、AMは総称して3Dプリンターと呼ばれるようになり製品開発に不可欠な手段となっている⁶⁾。3Dプリンターには造形方式が複数存在しており、Table 2に各種その特徴を示す。

Table 2 Characteristics of resin additive manufacturing method.

積層技術	材料	手段
光造形法, SLA	感光性樹脂	LASER, ランプ
粉末焼結法	熱可塑性樹脂	LASER, 電子線
熔融樹脂積層法	熱可塑性樹脂	熱
インクジェット法	感光性樹脂	インクジェット

本稿では、精度と硬化速度の観点から紫外光を液体状の感光性樹脂に照射して積層造形を行うSLA (Stereolithography Apparatus) 方式に着目した。SLA方式内にも複数の種類が存在する。上部のUV光を下部の液相中に照射し固めていきながらステージを下側に動かしていく自由液面方式（液相光造形法）や、下方のバットの中に液体を満たし、その下部からUV光を照射し、吊り下げられたステージを上部に動かしていく2次元規制法などがある。自由液面方式においてはUV光を照射する前にブレード状の治具で液面を均す必要がある。光硬化性樹脂は粘度が高いものが多く、テーブルを1層分下げただけでは次のUV光を照射する工程までに液面を均一にすることができず、造形不良を起こすことがあるためである。液面を均す工程では、積層中の造形物から

1層分に相当する距離（50～300 μm）にブレードを配置して均すことが一般的であるが、造形物とブレードの距離が近いと、反りやすい光硬化性樹脂を用いると造形物とブレードが接触し、造形不良になる。造形物がブレードと接触すると造形物の一部が削り取られてしまい、うまく積層ができずFig. 1のような状態になってしまう。少なくとも造形中における反りが300 μm以下である光硬化性樹脂が求められる。



Fig. 1 Example of a failure due to collision between the object and the blade.

光硬化性樹脂により、これまで様々な特徴を持った3Dプリント用材料が開発されてきた。従来の光硬化性樹脂はエポキシなどの反りにくい材料を使用しているため、水を吸収しやすく寸法変化が大きいといった不具合があった。従来の解決方法では、耐水性の高い原材料の利用や反応性の工夫によって湿度や水分による経時変化を抑制する試みがなされていた⁷⁾。しかしながら、一般的にエポキシ樹脂は2%前後の吸水率であり⁸⁾、水中での長期使用は吸水による強度低下により造形物が壊れてしまう。一方で、アクリル樹脂の吸水性は0.3%程度⁹⁾とエポキシ樹脂と比較して良好であるが、重合反応に伴う体積収縮による内部応力により、反りが発生しやすい^{10,11)}。そのため、自由液面方式では造形エラーになることが多くアクリルの特性として興味を持たれても使いこなせなかった材料である。本稿ではアクリル樹脂

の反りを低減させ、アクリル樹脂が持つ高耐水性を生かした3Dプリンター材料について検討した。

2. 高耐水性3Dプリント用インク材料の検討

2-1 アクリル樹脂の反り改善

アクリル樹脂インクの課題である反りに対して、硬化反応の制御による改善を行った。まず、添加剤の構造による反りに対する効果を確認した。ベースとなるインクに対して各添加剤を5 wt%加え、反り、消泡性、添加剤単体の粘度を評価した。その結果をTable 3に示す。3D造形装置（DARAM3：ディーマック社製）を用いて0.2 mm～0.3 mmの薄膜を作製し、薄膜の反り具合を評価した。反りの評価では床面から反り上がった薄膜端部との距離を測定した（Fig. 2）。消泡性の評価では造形時に液面に発生する泡とブレードによる液面均しによって消泡の有無を確認した。その結果、ポリエーテルポリオール類及びポリエーテル変性を基本骨格に持つ添加剤において反りに対して特に効果があることが分かった。材料単体としての取り扱いのしやすさ、造形時における消泡性の優位性からポリエーテルポリオール類の添加剤を採用した。

Table 3 Relationship between additive agent types and quality.

基本骨格	ポリエーテルポリオール類	ポリエーテルシロキサン類	ポリエーテル変性	フッ素系	IPA
そり	○	△	○	△	×
消泡性	○	△	△	△	○
粘度	○	○	×	×	○

そり ○：2mm未満 △：2～4mm ×：4mm以上
 消泡性 ○：泡発生なし △：ブレードにて消泡可能 ×：ブレードにて消泡不可
 粘度 ○：1,000 mPa・s未満 △：1000 mPa・s以上 ×：個体

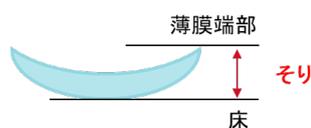


Fig. 2 Warpage evaluation method.

次に、ポリエーテルポリオール類の添加剤の添加量振りを行った。その結果をFig. 3に示す。添加剤の添加量を増やすことで徐々に反りが改善され、添加量が10 wt%では300 μm以下の反りを実現することができた。添加剤が反りに与える影響を検証するため、各薄膜の表面と裏面の重合反応率を比較した。これにはFT-IR測定装置（Nicolet6700：島津製作所社製）を用いた。添加剤の添加量0, 1, 3, 5, 10 wt%で作成した各N3の薄膜における表面と裏面のIRスペクトルを測定した。例として添加量3 wt%のときの薄膜におけるIRスペクトルをFig. 4に示す。図中に示す赤帯はC=C結合由来のピークであり、それぞれアクリレート基のC=C伸縮（1,635 cm⁻¹）、C-H対称偏角（1,405 cm⁻¹）、C-H非対称面内変角（810 cm⁻¹）を示す¹²⁾。その中でも特にピーク強度の高い1,405 cm⁻¹のピークより、重合反応の進行度を確認した。

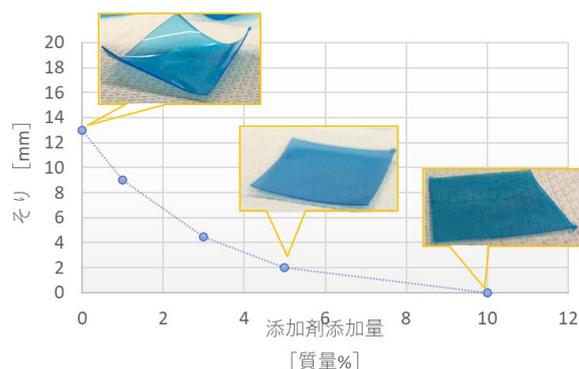


Fig. 3 Dependence of the amount of warpage on the additive agent.

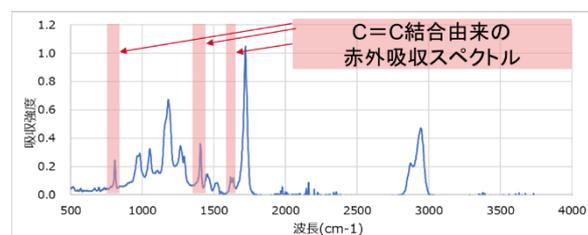


Fig. 4 IR spectrum of the thin film with 3 wt% additive agent.

続いて、各薄膜の1,405 cm⁻¹における表面と裏面の吸収強度の差をプロットしたグラフをFig. 5に示す。

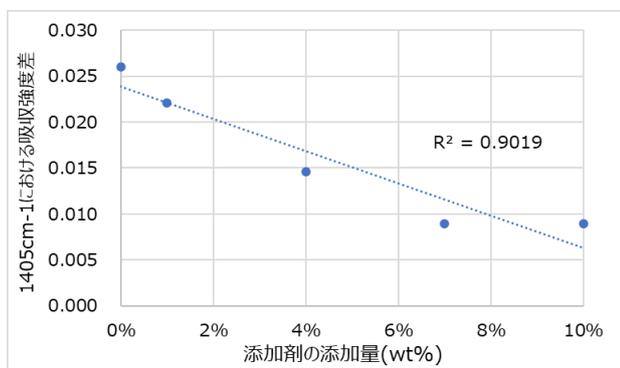


Fig. 5 Difference in absorption intensity at 1,405 cm⁻¹ in the IR spectrum of a thin film between the front and back surfaces of the sample (absorption intensity on the back side – absorption intensity on the front side).

その結果、添加剤の添加量を増やすことによって、表面と裏面の重合度の差（裏面の吸収強度－表面の吸収強度）が小さくなるのが分かった。このことから、反りの発生は薄膜の表面と裏面の重合度の差に由来すると推定できる。また、表面（レーザーが当たる面）の方が吸収強度が小さくなり、重合度が大きくなるといえる。

反り低減のメカニズムを以下のように考察した。添加剤の添加により、ラジカル重合反応時にインクの固液界面（重合反応部と未反応部）へ界面活性剤効果によって添加剤が配向する。配向した添加剤が固液界面での反応を阻害することで、液体中のモノマーよりも固体中（薄膜内部）のモノマーに対して反応が促進される。その結果、薄膜の表面と裏面の硬化収縮の差がなくなり、反りの発生を抑制したと考えられる (Fig. 6)。

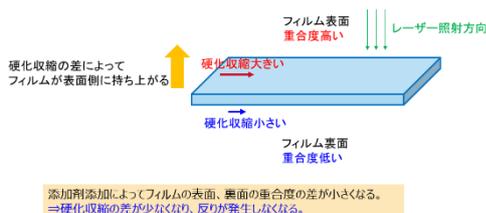


Fig. 6 Mechanism for warpage reduction.

本インクを用いた造形素材の材料特性として、曲げ強度、破断時の歪み、23℃の水に120日浸漬後の吸水率の評価結果をTable 4に示す。なお、評価は60℃、60 minで二次硬化後の結果である。使用した他社メーカー品は光造形方式のエポキシ樹脂材料で、120日浸漬後は分解したため計測は不可能であった。

Table 4 Material properties after 3D printing with developed ink.

測定項目	リコー品実測値	他社品実測値
曲げ強度 (MPa)	75	70
破断時の歪み (%)	5	15
120日後の吸水率 (%)	0.75	-

2-2 造形物の耐久性

2-2-1 耐水性

従来の光硬化樹脂はエポキシ等の反りにくい材料を使用しているため、水を吸収しやすく耐水性が低いという欠点があった。今回見出した添加剤により反りの課題を解決したことで、アクリルの特性である耐水性を生かすことができた。また、今回開発したアクリル樹脂は分子構造に嵩高い構造を持つ材料を採用することにより、従来の硬化物よりも硬化密度が高くなり、耐水性がより向上する。耐水性の評価は下水道協会誌に記載のガイドラインに沿って、浸漬後曲げ試験を実施した¹³⁾。水に浸漬させ、取り出した試験片を乾燥させず、濡れた状態で曲げ試験を行った。実際に水に浸漬している状態を想定し、浸漬温度は60℃で実施した。浸漬期間の加速係数は12倍とした。縦軸：弾性保持率、横軸：浸漬期間とし、弾性保持率は下記に示す算出式を用いた。

$$R = \frac{E_2}{E_1} \times 100$$

R：弾性保持率 (%)

E₁：初期の曲げ弾性率

E₂：浸漬後の曲げ弾性率

保持弾性率70%を閾値として耐水年数の評価を実施した。なお保持弾性率の閾値はガイドラインに記載の数値より設定した。その結果をFig. 7に示す。開発した樹脂は3年以上強度を保持することを確認した (Table 5に他メーカー材料とともに示す)。

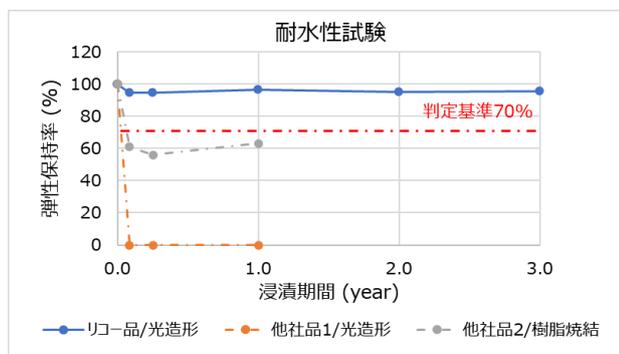


Fig. 7 Long-term water resistance data.

Table 5 Water resistance of developed ink.

	造形方法	樹脂材料	耐水年数
リコー品	光造形	アクリル	>3年
他社品1	光造形	エポキシ	<1カ月
他社品2	樹脂焼結造形	PA12	<1カ月

さらには、他メーカー材料についても同様に試験を行ったところ、他メーカー品よりも高い耐水性を有する結果が得られた。他社で使用されている一般的な光造形方式の材料では、吸水率が非常に高いため、極端に強度が低下した。また、実際に機能試作でよく使われている粉末積層法で使用される材料 (他社品2: ポリアミド12 (PA12)) はすぐに70%の閾値を超えてしまうことが分かった。機能試作などにより実用的なレベルで長期間水を扱う分野には、本材料の効果が高いことが示唆された。

3. 3Dプリントによる高効率水車羽根の検討

3-1 3Dプリントによる樹脂製羽根のメリット

再生可能エネルギーの一つに考えられる水力発電は比較的安定した出力で発電できる一方、設置環境に合わせて装置及び水車羽根の設計が必要になり、様々な研究が行われている。例えば、シミュレーションを用いてフランス水車ランナ翼 (水車羽根の形) の最適化の検討が行われているが¹⁴⁾、実際にランナ翼を作って発電効率の検討をすることができていない。また、螺旋水車発電機により発電効率の良い急斜面及び落差工を利用した螺旋水車の開発も行われている¹⁵⁾が、装置の設置方法の検討であり、水車羽根についての開発はこれまであまり行われていなかった。その背景として、金属製羽根の作製は手作業であるため、複雑なものが作れず作成期間が長期化するという問題がある。本章では、3Dプリントによるメリット及び金属製の羽根を樹脂製の羽根に変えたことによるメリットについて報告する。

3-1-1 3Dプリントによるメリット[納期短縮]

Fig. 8に示す直径150 mm、高さ170 mmの金属羽根の作製を羽根作製メーカーに依頼したところ1か月を要した。一方で、同サイズの羽根を3Dプリントにより作製したところ15時間で完成した。またFig. 8に樹脂製羽根も示すが、羽根角度を変更しても、羽根に斜めやひねりを加えても問題なく造形することができた。このことにより、従来検討が進んでいなかった羽根形状変更による最適な水車形状を短期間で探索することができるようになった。今回詳細は割愛するが、実際に約27種類の水車を約3か月間で作成して水車の発電実験を行うことができた。



Fig. 8 Photo of metal water wheel and resin water wheel.

3-1-2 樹脂製羽根によるメリット[軽量化]

水車設置に際して、装置重量が500 kgを超えると、装置搬入の際に有資格者による作業、電動機での吊り下げなどが必要になるため、設置に対して1段階ハードルが上がってしまう。また、作業者の負担を軽減するためにも装置の低重量化が望まれている。実際に直径280 mm、高さ280 mmの羽根を作製したところ、金属製羽根は20 kg、樹脂製羽根は4 kgと重量が1/5に軽量化できることを確認した。また、実際に下水処理施設にヒアリングすると、装置が錆びやすい環境での設置希望が多いことが分かった。一般的に樹脂は錆びない材料であるが、このメリットを生かすことができるのか、金属製羽根と樹脂製羽根の耐錆性について調査した。発電実験後に装置を引き上げて1週間ほど放置したときの様子をFig. 9に示す。金属製羽根は所々錆びてしまっていたが、樹脂製羽根は錆びることはなく、これまで敬遠されていた錆びやすい環境でも問題なく使用できることを確認した。



Fig. 9 Water wheels left one week after experiment.

3-2 発電効率の検討

羽根サイズが280 mm×280 mm×280 mmの樹脂製羽根を作製しFig. 10に示すような小水力発電の実験装置を作成し、静岡県の浄化センターで実施検討を行った。



Fig. 10 Developed small scall hydroelectric power generation device.

検討時の条件は次の通りである。平均流量：0.4 m³/s, 越水量：0.2 m³/s. この条件で発電した際の理論仕事量は3.9 kWである。

今回、比較として従来の金属製水車も併せて検証を行った。各水車で得られた結果をTable 6に示す。

Table 6 Water wheel performance comparison.

	金属製水車	樹脂製水車
出力	1.5kW(0.75kW×2)	1.5kW(0.75kW×2)
発電効率	38.3%	38.3%

羽根が2個付いているため、2個の羽根から得られる合計の値がその水車の出力となり、結果はおおよそ1.5 kWである。また、その際の発電効率は38.3%と金属製水車とほぼ同じ結果となった。樹脂製水車でもこれまで使われていた金属製水車と同等の性能を出せることが分かった。現在、樹脂製水車については連続耐久試験中で3か月経過したが、初期出力と変わらず1.5 kWで稼働中である (Fig. 11)。



Fig. 11 Developed small scall hydroelectric power generation device in operation.

4. 成果と今後の展開

ポリオール系添加剤によって3Dプリント用高耐水性インクを開発することができた。このことにより、これまでできなかった3Dプリントによる水力発電用水車羽根製造プロセスが適用可能になった。また、3Dプリントならではの特殊形状の羽根を作製し、低コスト、低重量でありながら、従来の羽根と同等の発電効率を達成することができた。現在、小規模発電装置を普及する活動を全国で展開している。

謝辞

本事業は、国土交通省 下水道応用研究の助成を受け、リコーが研究代表として、3Dプリンターを使用した下水道放流域での低落差対応マイクロ水力発電として採択され検討を行いました。

参考文献

- 1) 大川被服株式会社: 古いけれど、実は新しい自然エネルギー「小水力発電」。その秘めたる発展性とは? (No.2), <https://wawawork.work/workerstrand/industry/1606/> (参照 2023-12-05).
- 2) GraphToChart: 日本の水力発電による発電量の割合 (推移と比較グラフ), <https://graphtochart.com/infrastructure/japan-electricity-production-from-hydroelectric-sources-of-total.php> (参照 2023-12-05).
- 3) H. Inoue, A. R. Keeley: Barriers and Obstacles to Development of Mini-Hydro Energy in Japan: From the Perspectives of Project Developers, *Journal of the Japan Institute of Energy*, Vol. 97, No. 8, pp. 245-251 (2018).
- 4) 伊藤康: 小水力発電の現状・意義と普及のための制度面での課題, *科学技術動向*, Vol. 129, pp. 10-20 (2012).
- 5) 国土交通省: 下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書, <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/seweraage/content/001476160.pdf> (2022).
- 6) 山口修一ほか: 産業用3Dプリンターの最新技術・材料・応用事例, シーエムシー出版, pp. 66-75 (2022).
- 7) 萩原恒夫: 光造形用樹脂の最近の進歩と開発動向, *精密工学会誌*, 70巻, 2号, pp. 171-174 (2004).
- 8) 垣内弘: エポキシ樹脂-最近の進歩-「熱硬化性樹脂」, Vol. 15, No. 3, pp. 149-157 (1994).
- 9) 岸本祐一郎: アクリル樹脂の特徴と加工方法 (討論会テーマ: X線診断領域に用いるファントムでわかること, 第34回計測分科会討論会(1)), *計測分科会誌*, Vol. 17, No. 2, pp. 4-5 (2009).
- 10) 平岡孝朗ほか: UVインクジェットインク塗膜の内部応力制御, *Ricoh Technical Report*, No. 39, pp. 140-145 (2014).
- 11) 肥田敬治: UV硬化塗料, *表面技術*, 69巻, 2号, pp. 73-79 (2018).
- 12) 竹中直巴ほか: 最新 UV硬化樹脂の最適化, p. 221, 技術情報協会出版 (2008).
- 13) 久保内昌敏: CIPPに対する新たな耐薬品性試験(案) -薬品浸漬後の曲げ弾性率測定試験について-, *下水道協会誌*, Vol. 52, No. 629, pp.78-82 (2015).
- 14) 川尻秀之, 榎本保之: フランス水車ランナの多目的設計最適化, *ターボ機械*, Vol. 56, No. 12, pp. 39-43 (2018).

- 15) 瀧本裕士ほか: マイクロ水力発電用螺旋水車の動力特性と効率化に関する研究, 農業農村工学会論文集, No. 82, pp. 59-66 (2014).